INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

# annales agronomiques

Bimestriel

1972

Vol. 23 . N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1972, **23** (1), 5-30.

# LES CLASSEMENTS DE TERRAINS

A. MARIN-LAFLÈCHE

*Station agronomique, I. N. R. A.,*
*02 - Laon*

## RÉSUMÉ

Les terrains qui sont susceptibles d'utilisations très diverses représentent un bien qu'il s'agit de gérer au mieux des intérêts de la collectivité. De ce fait, leur répartition doit tenir compte des besoins qui se manifestent pour une utilisation donnée et de leur aptitude aux diverses utilisations.

La recherche des aptitudes des terrains à une utilisation donnée, et en particulier à l'agriculture, prend de plus en plus d'importance.

De nombreux systèmes de classement des terrains ont été proposés. L'objet de cette mise au point consiste à étudier ces systèmes de façon à dégager les principes généraux qu'ils mettent en œuvre. On peut aussi faire apparaître les points communs de ces systèmes, et notamment distinguer les classifications physiques basées sur les caractéristiques du milieu et les classifications à base économique qui utilisent les résultats de l'utilisation du milieu.

En annexe sont donnés en exemple deux systèmes très élaborés de classement de terre.

## INTRODUCTION

Le sol devient, dans le contexte actuel, un « bien » à partager entre un nombre toujours plus grand d'utilisateurs. D'un point de vue général, on peut en effet envisager d'affecter une superficie donnée :

— à la production agricole,
— à l'urbanisation,
— au transport des personnes, des matières, de l'énergie,
— aux loisirs.

On peut aussi ne pas utiliser momentanément certaines zones que l'on met en défense pour sauvegarder certains équilibres biologiques.

Les utilisateurs de l'espace rural se tournent de plus en plus souvent vers les spécialistes pour leur demander de préciser les contraintes exercées par le milieu sur telle ou telle utilisation, en classant les terrains d'une zone donnée selon leurs aptitudes actuelle ou potentielle aux objectifs fixés.

Mais, de leur côté, ces spécialistes hésitent entre deux attitudes :

— soit ils estiment qu'il est impossible actuellement de donner une réponse satisfaisante en raison de la multiplicité des facteurs mis en jeu, et préfèrent se limiter à l'étude de certains d'entre eux ;

— soit ils acceptent de porter tout de suite un jugement de valeur globale en schématisant la réalité, quitte à améliorer ce jugement à mesure que l'action des facteurs sera précisée par de nouvelles recherches.

L'urgence des questions auxquelles il faut bien répondre nous conduit à nous rapprocher de la seconde position, tout en étant conscient des risques pris.

Quoiqu'on tende de plus en plus à utiliser l'espace rural à des fins non agricoles, c'est la recherche des aptitudes culturales qui retiendra notre attention, ne serait-ce que pour les raisons suivantes : l'utilisation rationnelle des terres à des fins non agricoles devrait s'orienter dans la mesure du possible vers les terres « les moins fertiles » ; de plus, la démarche qui consiste à caractériser l'aptitude globale à l'agriculture d'un milieu donné n'est pas fondamentalement différente de celle permettant de définir les aptitudes autres qu'agricoles. En effet, les solutions proposées jusqu'ici pour répondre à ces divers problèmes d'utilisation aboutissent toutes à des classements qui diffèrent davantage par le poids relatif donné aux différents critères que par la nature même de ces critères (SMITH, 1965).

L'examen de nombreux systèmes de classification montre qu'il est possible de les regrouper en quelques types. L'objet de cette mise au point est d'exposer les principes qui sous-tendent ces différents types de classement et d'en étudier les avantages et les inconvénients.

## I. — LA NOTION D'APTITUDE ET SON UTILISATION DANS LE CLASSEMENT DES TERRES

L'emploi de termes tels qu'aptitude, potentialité, vocation, implique déjà un choix qui n'est pas toujours ressenti par ceux qui les utilisent. C'est pourquoi nous examinerons la signification de ces termes et indiquerons l'accception que nous leur donnons pour éviter toute confusion dans la suite de l'exposé.

On a constaté que la répartition harmonieuse des hommes et des richesses sur le territoire ne se fait pas d'elle-même ; c'est pourquoi l'aménagement du territoire s'est donné pour objectif de « remplacer une organisation spontanée de l'espace par une organisation cohérente ».

Le partage de cette richesse que représente le territoire entre les diverses utilisations possibles devrait se faire en fonction :

— du degré d'aptitude des terrains à une utilisation donnée ;

— des besoins des différents utilisateurs et de la collectivité en terrains d'affectation donnée ;

— des besoins des différents utilisateurs ;

— de l'intérêt général des collectivités au sein desquelles agissent les utilisateurs.

Quoique ce dernier point concerne également le chercheur, on lui demande, en fait, de fournir des éléments portant uniquement sur le premier point.

Rappelons tout d'abord que le concept de terrain est plus large que celui du sol (MONNIER, 1965). Il désigne, pour nous, une surface présentant certains caractères dominants, physiques en particulier, qui l'originalisent dans le contexte géographique. Exemple : un terrain marécageux, un terrain en pente...

Un terrain présente un ensemble de qualités et de défauts qui le rendent plus ou moins propice à telle ou telle utilisation. Cet ensemble découle des considérations liées au terrain lui-même (facteurs intrinsèques), et à sa situation par rapport aux autres terrains (facteurs extrinsèques). C'est la considération de cet ensemble de qualités et de défauts qui permet d'aboutir à la notion d'aptitude du terrain à l'utilisation envisagée.

Cependant, les progrès techniques rendent de plus en plus faciles et donc de plus en plus fréquentes les modifications du milieu, ce qui entraîne un changement de ses aptitudes. Mais ces modifications du milieu, qui améliorent par exemple la production d'une culture donnée ou permettent d'introduire de nouvelles cultures, coûtent plus ou moins cher selon leur nature et selon le milieu où elles sont apportées. A la limite, on peut amener n'importe quel terrain au niveau de production maximum à condition d'y mettre le prix. Mais à rendement maximum égal, le bénéfice retiré de la récolte est très différent selon les situations. En d'autres termes, il coûte plus cher de produire par exemple un quintal de blé sur un terrain que sur un autre.

On devrait donc être conduit à faire la balance entre la valeur d'une production et ce qu'il en a coûté pour l'obtenir.

L'estimation des aptitudes dépend alors d'un jugement économique, mais nous verrons que ce jugement satisfaisant sur le plan théorique, n'est pas en fait sans présenter de graves inconvénients pratiques.

En tenant compte des considérations précédentes, nous distinguons l'aptitude actuelle d'un terrain et son aptitude potentielle :

Nous appelons « *aptitude actuelle d'un terrain* » l'aptitude qu'il présente au moment de son utilisation, c'est-à-dire compte tenu des modifications qui lui ont déjà été apportées.

« *L'aptitude potentielle* » de ce terrain se définit comme la nouvelle aptitude qu'il est susceptible d'acquérir après amélioration de certaines de ses caractéristiques. Pour rester dans le domaine de la pratique on ne considère que les caractères les plus coûteux à modifier dans l'état actuel des connaissances et des techniques. D'autre part l'artificialisation d'un milieu cultural pouvant être plus ou moins importante, on peut évidemment définir autant d'aptitudes potentielles pour un terrain qu'on envisage de niveaux et de types d'améliorations.

Il est bien évident qu'on ne peut juger de ces aptitudes potentielles que si on dispose d'une évaluation suffisamment précise des coûts de correction du terrain et de l'accroissement de production qui peut en résulter.

Remarquons que les considérations précédentes ne font pas intervenir *les besoins* en terrains pour une utilisation donnée. En effet, un terrain peut avoir une aptitude

agricole actuelle faible par suite de conditions défavorables, mais s'il est dans une région où les besoins en terrains agricoles sont particulièrement importants, cela justifiera les aménagements nécessaires. Inversement, un terrain à aptitude agricole remarquable, mais situé dans la zone d'extension d'une ville appelée à un développement rapide, aura des chances très faibles d'être utilisé pour l'agriculture.

La détermination de ces besoins en terrains pour chaque utilisation devrait résulter de considérations économiques et sociales se concrétisant par une décision politique. Cela n'est donc pas de notre ressort mais nous l'évoquons cependant pour bien définir les limites de notre étude.

On parle souvent de la « *vocation* » d'un terrain (BRETON, 1962). Jusqu'à présent, les utilisateurs de ce vocable sous-entendaient une prédestination de certains terrains : par suite de conditions naturelles souvent extrêmes en bien ou en mal, un terrain semblait appeler une utilisation donnée. C'est ainsi qu'on parle couramment de la vocation herbagère de la Thiérache parce que cette région se prête bien par son climat et ses sols à l'exploitation de prairies permanentes et mal aux cultures assolées.

Pour nous, la vocation d'un terrain pour une utilisation donnée résulte de la confrontation des aptitudes actuelle et potentielle et des besoins en terrains pour cette utilisation. Nous lui donnons donc un sens beaucoup moins restrictif parce que d'une part, les possibilités d'amélioration des terres sont beaucoup plus grandes qu'autrefois, et que d'autre part leur affectation est de plus en plus imposée par des impératifs économiques ou des exigences particulières propres aux sociétés industrielles (zones de loisirs).

## II. — LES ÉLÉMENTS PRINCIPAUX D'UNE CLASSIFICATION

Pour répondre aux préoccupations des utilisateurs de l'espace rural, les auteurs classent les terrains selon leur degré de convenance aux utilisations fixées. La démarche qui permet d'aboutir à une classification peut se schématiser ainsi :

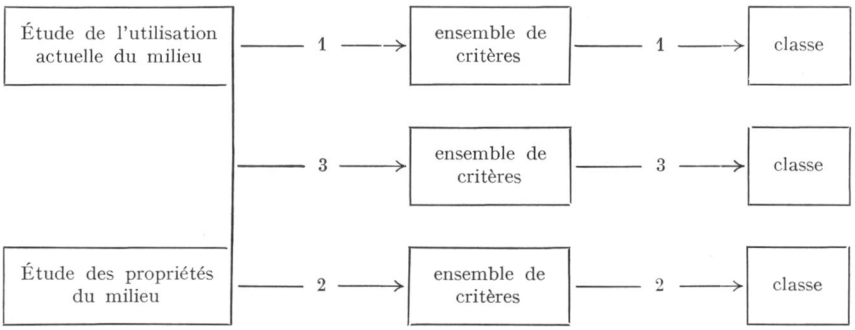



FIG. 1. — *Étapes conduisant à un classement*

Tout classement consiste à répartir des individus (dans le cas présent ce sont des terrains) en groupes (ou classes) : pour ranger les individus dans une classe, il faut évidemment se fixer des critères de rangement.

La première phase consiste à déduire un ensemble de critères (qu'on peut considérer comme les composantes d'un « vecteur critère ») soit de l'utilisation du milieu (1) (paysage rural, cultures pratiquées, rendements...), soit d'un certain nombre de ses propriétés (2) supposées jouer un grand rôle dans son utilisation (profondeur du sol, texture, climat...), soit enfin à la fois de l'utilisation et des propriétés de ce milieu (3).

La seconde phase consiste à établir une correspondance entre la valeur du « vecteur critère » et une classe ; autrement dit la classe elle-même peut correspondre aux critères dérivés de l'utilisation actuelle ou à ceux déduits des propriétés du milieu, soit enfin aux deux.

La définition de ces classes et le choix de leur nombre dépendent de l'objectif poursuivi; c'est ainsi que de très nombreux systèmes de classification ont été proposés.

Plutôt que de les présenter isolément comme nous l'avons fait en annexe pour certains d'entre eux (cf. Annexes 1 et 2), nous nous proposons d'analyser ici ce qui les rapproche ou les différencie : buts, classes, choix des critères, démarche établissant la correspondance entre les critères utilisés et les classes.

### 2. 1. — *Le ou les buts du classement*

Le but poursuivi est le premier élément à considérer. Sans en donner une liste exhaustive, on peut citer les principaux buts (Vink, 1963; XXX, 1966) :

— aménagement du territoire,
— utilisation agricole du sol :
  • systèmes de culture et de production ;
  • installation ou extension possible d'une culture,
— opportunité de certaines techniques (irrigation, drainage...),
— protection de la nature :
  • lutte contre l'érosion,
— valeur foncière (imposition, remembrement...).

On peut, dès à présent, faire les remarques suivantes :

La durée de l'action projetée doit se retrouver dans le choix des critères : un objectif à long terme implique, par exemple, l'adoption de critères « permanents », tandis que des préoccupations économiques conduisent à l'utilisation de critères plus variables dans le temps.

De même, il est important de préciser l'extension de la région où le classement est fait : dans une zone peu étendue, les conditions climatiques peuvent être considérées comme *homogènes* et n'interviennent donc pas comme critères, alors qu'il pourrait ne plus en être de même pour une région plus vaste.

Selon les buts poursuivis et la demande de l'utilisateur, le système de classement sera plus ou moins élaboré : on peut concevoir des systèmes simples, mais de valeur générale, qui caractérisent les terrains par quelques paramètres ayant une signification dans un grand nombre d'utilisations, jusqu'à des systèmes plus complexes et très spécialisés qui prévoient, par exemple, deux classes : une *classe apte* et une *classe non apte* à une utilisation donnée.

Ces quelques remarques permettent de montrer qu'il est difficile, voire impossible, (Mulcahy *et al.*, 1967) de proposer des principes généraux de classification des

terrains. Certains auteurs (MARBUT) se sont efforcés de créer de véritables *classifications* ayant une valeur générale, c'est-à-dire susceptibles de répondre à un problème d'utilisation n'importe où dans le monde. Ces tentatives furent des échecs (JACKS, 1946) et nous retiendrons que chaque problème d'utilisation du sol dans une région donnée nécessite son propre système de classement. « La première exigence pour le développement et la réussite d'un système de classification est une claire compréhension des problèmes pour lesquels on a besoin de la classification » (KELLOG, 1937).

### 2. 2. — *Les différentes formes de systèmes de classement*

Il semble qu'on puisse distinguer schématiquement trois catégories :

a) *Classements du type inventaire.*

Certains auteurs définissent un type de terrain (« Natural land type ») comme une « somme de caractéristiques plutôt que comme une synthèse de celles-ci » (JACKS, 1946). Par exemple, dans le système proposé par VEATCH (1941), les types de régions naturelles du Michigan sont des combinaisons des types de sol, des traits du relief et de la topographie ; autrement dit, un type de terrain est défini par une combinaison (ABC), un autre par une combinaison (XYZ).

Ces définitions condensées n'indiquent en aucune façon des relations d'ordre entre les classes (ABC) et (XYZ) ; il s'agit donc plutôt d'un inventaire qui peut avoir son utilité pour délimiter très sommairement des zones d'aptitude lorsqu'un problème d'utilisation est posé.

b) *Classements en vue d'un ensemble d'affectations.*

Dans quelques systèmes on va plus loin puisqu'on définit, *a priori*, un nombre donné de « classes d'utilisation ». A chaque classe correspond une utilisation sans qu'il y ait pour autant de relation d'ordre nette entre les différentes classes. Un exemple de tels systèmes est proposé par KELLOG (1935, 1937). Cet auteur distingue les classes suivantes : (1), polyculture ; (2), pâturage ; (3), forêt ; (4), loisirs ; (5), mines; (6), développement urbain ; (7), protection des équilibres naturels ; (8), conservation (eau, sol).

c) *Classements en classes ordonnées.*

Dans la grande majorité des systèmes de classement, les auteurs instituent une hiérarchie entre les classes ; ces dernières sont rangées dans un ordre, en général décroissant, par rapport à un point de vue. C'est, par exemple, le cas des grandes catégories distinguées dans le système de classement anglais proposé récemment pour préserver les meilleures terres agricoles des Iles Britanniques du développement anarchique de l'urbanisation (GRIFFITH, 1965) : *catégorie 1 :* terrains sans obstacles physiques (climat, sol, relief), très souples d'emploi et à préserver à tout prix ; *catégorie 2 :* terrains présentant quelques limitations ; *catégorie 3 :* terrains où des obstacles physiques limitent déjà l'éventail des cultures possibles ; *catégorie 4 :* terrains ayant de sévères limitations ; *catégorie 5 :* terrains inaptes à toute agriculture.

Nous retrouvons la même conception pour le système proposé par le service de la conservation des sols des U. S. A. avec ses huit classes principales d'aptitude : les premières classes correspondent aux meilleures terres agricoles, les dernières à celles

qui sont « aptes à d'autres utilisations qu'agricoles » (GLINGEBIEL, 1958) (cf. Annexe nº 1).

### 2. 3. — *Les critères de classement*

L'examen détaillé des différents systèmes de classement proposés montre que les auteurs sont susceptibles d'utiliser des critères de nature différente : certains critères sont des éléments *descriptifs* (succession des horizons dans un profil, cultures pratiquées), d'autres bien que qualitatifs sont susceptibles d'être ordonnés : nous les appelerons des critères *ordonnables :* c'est, par exemple, l'intensité de l'hydromorphie. Enfin certains critères sont *mesurables :* l'exemple type est le rendement d'une culture.

Il faut bien noter la différence entre critères mesurables et critères seulement ordonnables : quand, par exemple, on caractérise la qualité du drainage d'un sol par les termes de très favorable, favorable, passable... et qu'on attribue arbitrairement à ces catégories les chiffres 1, 2, 3... on ne quantifie pas le phénomène drainage, on ne fait rien d'autre que repérer sa gradation, c'est-à-dire 1 est plus favorable que 2, 2 est plus favorable que 3. En revanche, un rendement de 60 q est double d'un rendement de 30 q. Cette distinction est très importante lorsqu'on veut les combiner dans des indices globaux.

On peut également classer les critères d'un autre point de vue : certains dérivent directement des résultats de l'utilisation du milieu (système de culture actuel, rendement...) tandis que d'autres partent des éléments descriptifs du milieu.

#### 2. 31. *Critères partant des résultats de l'utilisation du milieu.*

a) *Utilisation actuelle du milieu.*

On peut classer les régions suivant les systèmes de culture qui y sont pratiqués (intensif, extensif) ou le type d'agriculture (polyculture, herbage). On aboutit ainsi plutôt à un inventaire de l'état actuel, qui traduit un compromis entre les aptitudes du milieu et les besoins. Mais une telle démarche, sans être inutile, a un caractère statique puisqu'on risque de ne pas avoir envisagé des utilisations meilleures. Ainsi, en Angleterre, les terres lourdes traditionnellement utilisées pour les herbages se sont révélées être des terres arables de première qualité, faciles à cultiver avec le matériel moderne, mais il a fallu les nécessités de la deuxième guerre mondiale pour faire cette constatation.

b) *Rendement.*

Il est très difficile de traduire en termes de conséquences pratiques les propriétés physico-chimiques du milieu. Certains auteurs pallient, en partie, cette difficulté en utilisant les rendements obtenus par les agriculteurs de la région étudiée. Pour une culture donnée, les rendements des diverses zones constituent ainsi une mesure de leurs aptitudes ; ils sont en quelque sorte « l'expression cristallisée de l'expérience des gens qui ont utilisé ou utilisent la région » (ABLEITER, 1940).

Pour une zone homogène donnée, le rendement peut dépendre d'un certain nombre de facteurs, ainsi :

— Le rendement peut être obtenu avec des degrés d'artificialisation différents suivant les exploitations. Aussi les systèmes de classement les plus élaborés imposent-ils des conditions standard pour l'obtention de ces rendements, par exemple sans

amendement ni engrais, ou sans amélioration foncière (système américain, cf. annexe nº 1).

— On a pu également distinguer les rendements obtenus avec des techniques de pointe de ceux obtenus avec les techniques couramment utilisées ; la différence entre les deux donnant une idée des améliorations possibles.

— Le rendement dépend des conditions météorologiques. Dans la plupart des systèmes où ce critère intervient, il s'agit du *rendement moyen* obtenu sur un certain nombre d'années.

— Le rendement est aussi influencé par la compétence de l'exploitant.

On est le plus souvent amené à envisager un ensemble de cultures. Comme le rendement de chacune d'elles peut être considéré comme une composante d'un « vecteur rendement », on peut caractériser les régions par leur vecteur rendement et en rester là. Si on veut ensuite ordonner ces régions les unes par rapport aux autres, on peut comparer leurs vecteurs rendement, mais une telle comparaison n'est possible que dans le cas exceptionnel où tous les rendements d'une région sont supérieurs aux rendements correspondants de l'autre. C'est pourquoi on est amené à transformer le vecteur rendement en un chiffre unique ; ainsi, KENDALL (1939) a proposé de caractériser une région par le module du vecteur rendement.

Une autre façon de faire consiste à transformer le vecteur rendement en un scalaire, ce qui revient à passer d'un espace à $n$ dimensions à un espace à une seule dimension. C'est ainsi que le rendement peut-être transformé en « quantité physique » : unités fourragères (LANGLET, 1969), calories, matières sèches totales ; pour cela on multiplie, par exemple, le vecteur rendement par la matrice uniligne des équivalents fourragers. Cette façon de procéder, rigoureuse du point de vue mathématique, a des implications dont il faut bien saisir l'importance : on juge du point de vue de la production fourragère, des pouvoirs calorifiques des productions, etc., ce qui n'a pas toujours une signification évidente. On peut aussi, de la même façon, transformer le rendement en valeur monétaire, ce qui conduit au revenu brut.

c) *Revenu brut.*

Le vecteur rendement est transformé en scalaire au moyen des prix de vente des cultures.

Le revenu brut apparaît ainsi comme une unité de mesure particulièrement utile et beaucoup plus satisfaisante que les « quantités physiques ». Son inconvénient majeur est de ne pas avoir une valeur permanente puisque les cours des produits sont variables. Il est donc difficile d'utiliser la valeur monétaire pour des prévisions à long terme, notamment pour l'aménagement du territoire.

d) *Revenu net.*

Cette technique revient à faire les comparaisons entre les coûts et les revenus. Cela conduit par exemple, pour une seule culture, à considérer que l'aptitude actuelle d'un milieu à cette culture est d'autant plus grande que ce milieu est capable de fournir la marge nette par unité de surface la plus élevée à celui qui le met en valeur. Autrement dit, de plusieurs milieux culturaux fournissant le même rendement d'un produit commercialisé au même prix, celui qui est actuellement le plus apte à la plante en question est celui pour lequel le coût global par unité de surface est le plus bas.

On peut se rendre compte des relations existant entre les éléments à prendre en considération dans cette technique sur le schéma ci-contre (fig. 2).

Ce schéma montre que l'aptitude actuelle d'un milieu à une culture, ainsi définie par l'utilisation du critère revenu net, apparaît comme une notion relative car contingente des résultats obtenus au sein d'exploitations agricoles et du contexte économique du lieu et du moment. La réalité paraît bien s'y refléter car le rendement physique, transformé en unités monétaires (en le multipliant par le prix du produit), mesure l'effort financier que l'agriculteur consent sur son milieu ainsi que la réponse de ce dernier aux techniques de l'agriculteur, compte tenu de toutes les interventions des années précédentes. Pour plus de clarté, nous avons distingué deux catégories de techniques : celles qui sont utilisées uniquement pour la culture considérée (quantité technique imputable/ha) et celles qui forment l'appareil de production de l'entreprise agricole (quantité technique non imputable/ha).

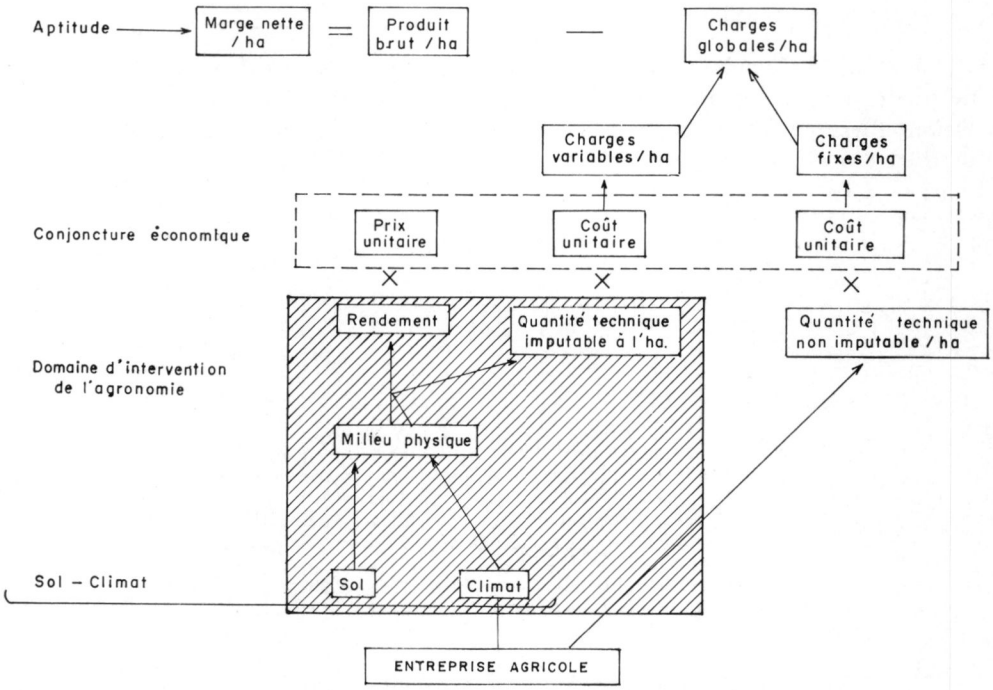



FIG. 2. — *Schéma des relations entre éléments concourant à la formation du critère marge nette*
(Cas d'une seule culture)

Le schéma précédent doit être multiplié autant de fois qu'il y a de cultures constituant la rotation, ce qui montre la complexité d'utilisation de ce schéma théorique.

Le revenu net permet de comparer efficacement les conditions de production et de tenir compte du fait que l'artificialisation du milieu, plus ou moins onéreuse, a une influence variable sur les rendements, selon les régions. On intègre également les conditions économiques telles que la proximité d'un marché, des voies de communications...

Les inconvénients sont ceux qui ont déjà été vus et qui découlent de l'utilisation de la valeur monétaire qui n'est pas constante dans le temps. D'autre part, la connaissance du revenu net est très complexe et nécessite des travaux importants et la collaboration d'agronomes et d'économistes.

Cette complexité n'est pas souvent conciliable avec l'urgence des réponses à apporter et en pratique on peut, dans une région et pour un ensemble de cultures données, avancer des hypothèses simplificatrices (hypothèses sur la conjoncture économique, sur le type d'entreprise agricole, sur les charges fixes et variables). Il devient alors possible d'utiliser des critères peut-être moins satisfaisants au plan des principes, mais plus accessibles que celui du revenu net. La valeur de tels systèmes repose alors entièrement sur la validité des hypothèses simplificatrices que l'on est amené à faire dans la région étudiée.

e) *Indices de revenu.*

La taille de l'exploitation, l'état d'entretien des bâtiments de ferme, le système de production, la superficie des parcelles... sont des indices du revenu de l'exploitation. Bien que ces indicateurs aient été beaucoup utilisés, ils ne semblent pas permettre un classement satisfaisant (JACKS, 1946).

TABLEAU I

| | Caractéristiques mesurables | Caractéristiques ordonnables |
|---|---|---|
| Sol | Profondeur<br>Propriétés mécaniques<br>Teneur en matière organique<br>Teneur en cailloux<br>Réserve en eau<br>Fractions granulométriques | Structure<br>Hydromorphie<br>Constitution du profil<br>Texture<br>Classe génétique<br>Degré d'évolution |
| Répartition des sols | Nombre de sols rencontrés par unité de surface | Homogénéité de répartition |
| Topographie | Altitude<br>Pente | Aspect du paysage (collines, etc.)<br>Exposition |
| Climat | Températures<br>Précipitations<br>Évapotranspiration potent.<br>Déficit climatique<br>Fréquence des gelées | Type de climat |
| Érosion | | Susceptibilité<br>Intensité<br>Forme |
| Ressources en eau | Profondeurs du plan d'eau | |

2. 32. — *Critères utilisant la description du milieu physique.*

Les aptitudes d'un milieu sont déduites de critères caractérisant ce milieu. On aboutit ainsi à des classifications *physiques* qui ont un caractère plus permanent que des classifications utilisant le revenu et que l'on peut qualifier d'*économiques*.

Les critères qui sont retenus sont les caractéristiques et les propriétés du milieu

— qui vont commander la croissance et le développement de la plante (ou des plantes). Ils vont reposer sur la connaissance des besoins de la plante ;

— qui traduisent l'aptitude des terrains à supporter les techniques utilisées pour la production de cette plante (ou de ces plantes).

Nous donnons une énumération des principaux critères utilisés, en distinguant ceux qui sont mesurables et ceux qui sont en général ordonnables (Tabl. 1).

La distinction entre critères ordonnables et mesurables n'est pas toujours aussi stricte : la teneur en cailloux, par exemple, peut être mesurée ou simplement appréciée ; dans ce dernier cas, elle est seulement ordonnable.

Indiquons également qu'il n'existe pas de caractéristiques du sol qui soient strictement permanentes. Elles sont, en fait, plus ou moins faciles à modifier ; c'est ainsi que la richesse chimique change plus facilement que les caractéristiques physiques qui exigent, en général, des améliorations foncières.

2. 33. — *Correspondances entre les caractéristiques du milieu et les résultats obtenus dans ce milieu.*

On peut chercher à faire correspondre à telle ou telle caractéristique du milieu le rendement d'une plante donnée et utiliser ensuite cette correspondance pour effectuer le classement. De très nombreuses relations statistiques ont été proposées : les unes sont très simples puisqu'il s'agit de chercher la relation entre une caractéristique (teneur en argile) et le rendement, les autres sont plus complexes et mettent en corrélation le rendement et plusieurs caractéristiques du milieu (DABIN, 1962).

Il importe, avant tout, qu'une part substantielle de la variation du rendement soit « expliquée », au sens statistique du terme, par la ou les caractéristiques envisagées. C'est pourquoi ces relations sont surtout utilisées dans les pays où les techniques culturales sont rudimentaires : le poids sur le rendement des caractéristiques du milieu est alors prépondérant. Par contre, pour les agriculteurs plus évolués, ces relations offrent peu d'intérêt car les corrélations que l'on peut établir entre quelques caractéristiques du sol et le rendement des cultures sont toujours très faibles et peu significatives (MULCAHY, 1967).

Enfin, l'existence de telles relations suppose une connaissance assez approfondie de l'écologie de la plante considérée. De telles études sont rares, mais on ne saurait assez souligner que leur existence conditionne en grande partie le degré d'approximation avec lequel on passe des caractéristiques du milieu à ses aptitudes lorsqu'on établit une classification physique.

Notons cependant que cette méthode est très utile aux forestiers, car elle leur permet de définir le meilleur habitat pour une essence donnée et de prévoir avec une bonne approximation les croissances en fonction des caractéristiques du milieu (XXX, 1951).

## III. — PROBLÈMES POSÉS PAR L'UTILISATION DE PLUSIEURS CRITÈRES

L'utilisation de plusieurs critères pose des problèmes différents suivant leur origine. Nous avons déjà vu que si l'on part de l'utilisation du sol, le vecteur rendement peut être facilement converti en une valeur unique, le rendement, sur lequel on effectue la comparaison.

Il n'en est plus de même si on utilise les critères décrivant le milieu, car le « vecteur critère » comprend des variables mesurables et des variables seulement ordonnables et par conséquent discrètes. L'utilisation de plusieurs critères pose donc des problèmes beaucoup plus difficiles.

Les auteurs des diverses classifications indiquent leurs buts et les critères utilisés, mais ils indiquent rarement comment ils passent d'un ensemble de critères à une classe. Compte tenu de l'importance de ce passage, nous tenterons cependant une analyse des diverses attitudes possibles.

Indiquons, au préalable, que la définition du but de la classification permet de ne prendre en compte que certains critères. Par exemple, le Service de Conservation des sols aux U. S. A. utilise 3 critères seulement : type de sol, pente et conditions d'érosion (cf. annexe 1).

Une fois retenus les critères nécessaires, plusieurs attitudes sont possibles selon les situations :

### 3. 1. — *Les grandes classes peuvent être établies à partir d'un critère seulement*

On peut ensuite diviser les classes précédentes en sous-classes à l'aide d'un critère de moindre importance. Il est possible par exemple de faire de grandes classes en distinguant le déficit climatique : chaque classe peut être par la suite subdivisée en sous-classes en considérant la profondeur du sol ; les sous-classes peuvent à leur tour être subdivisées (LANGLET, 1969).

Une telle façon de procéder implique une hiérarchie stricte entre les critères et l'absence de compensation totale entre eux ; c'est ainsi que si l'épaisseur du sol compense le déficit climatique jusqu'à un certain point seulement, la classification précédente reste valable. Remarquons enfin que la hiérarchie supposée entre les critères n'est valable que pour une région donnée : dans une région où le climat est très humide avec des pluies régulièrement réparties, cette hiérarchie sera évidemment très différente de celle que nous avons donnée.

### 3. 2. — *Les grandes classes peuvent être établies en considérant l'ensemble des critères retenus*

On donne à ces derniers des poids et des expressions différents (caractères mesurables ou simplement ordonnables). Beaucoup de cas sont alors possibles, mais ils demandent tous une prise de position subjective qui peut être plus ou moins systématisée. Il y a là une différence fondamentale avec les méthodes qui permettent de passer par exemple d'un vecteur rendement à un scalaire (unité fourragère, revenu brut) qui a, en général, une signification physique ou économique.

3. 21. — *On peut définir un indice global de classement par la combinaison de deux ou plusieurs indices composants.*

Par exemple, en Afrique du Sud, on distingue 4 classes d'irrigation (I à IV) en combinant 3 classes de perméabilité du profil et 3 classes de salure, d'après le tableau ci-dessous (JACKS,1946) :

TABLEAU 2

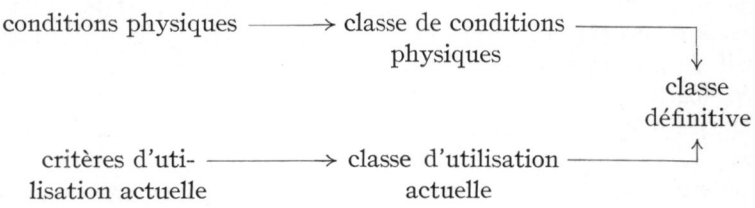
| | | Salure | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Perméabilité du profil | 1 | I | IV | IV |
| | 2 | II | III | IV |
| | 3 | IV | IV | IV |

3. 22. — *On peut également établir une correspondance entre un ensemble de valeurs des critères et la classe :*

sol : 3
profondeur du profil : 60 cm
structure : 2
susceptibilité à l'érosion : 4
} ⟶ Utilisation *x* ou classe *n*

Cette façon d'opérer, quoique subjective, constitue un progrès par rapport au jugement intuitif global non formulé : en effet, on fait d'abord l'inventaire des critères utiles qu'on mesure ou classe ; on porte ensuite un jugement global après avoir considéré chaque critère séparément. Cette méthode a été utilisée par HUDSON (1936, TENNESSEE VALLEY AUTHORITY) : on considère les conditions physiques (pente, drainage, érosion, teneur en cailloux, affleurements rocheux, profondeur du sol, fertilité) auxquelles on attribue des notes ; on tire de ces notes « l'indice de classe des conditions physiques ». On tire également un « indice d'utilisation actuelle » de l'examen des critères suivants : utilisation principale (polyculture, forêt), activité agricole dominante (maïs, blé, bovins,...), taille des parcelles, quantité de terre inculte, qualité des bâtiments de ferme. L'indice de classement définitif est ensuite tiré des deux indices de condition physique et d'utilisation actuelle.

L'obtention de cet indice unique se schématise ainsi :



Cette méthode revient à considérer séparément chaque critère avant de porter un jugement intuitif global.

3. 23. *On peut tenter de donner une formulation systématique au jugement global précédent en calculant des indices.*

Il est possible par analogie avec ce qui a été fait pour le vecteur rendement, de chercher une expression commune à tous les critères ; c'est par exemple ce qui est fait dans la méthode des indices de pondération, très utilisée dans les systèmes de classement allemands du début du siècle pour le calcul de l'impôt foncier (JACKS, 1946). Elle consiste à attribuer un certain nombre de points à chaque critère.

Par exemple, dans le système westphalien proposé par BÖMER (Von NOSTITZ, 1929) la répartition des points est faite de la façon suivante :

| Critères | Nbre max. de points |
|---|---|
| Facteurs intrinsèques : | |
| Nature de l'horizon de surface | 20 |
| Épaisseur | 10 |
| Conditions de la nappe phréatique | 10 |
| Topographie | 8 |
| Total « facteur sol » | 48 |
| Facteurs extrinsèques : | |
| Climat (température, pluie) | 18 |
| Marchés | 17 |
| Type d'agriculture | 7 |
| Distance de la parcelle à la ferme | 5 |
| Facilité de travail du sol | 5 |
| Total « facteur environnement » | 52 |
| Total général | 100 |

Une fois résolu le problème de l'importance relative à donner à chaque critère, il faut les combiner pour obtenir un nombre unique.

a) *La relation additive.*

La relation additive a été très fréquemment utilisée. C'est le cas notamment dans un essai de classement d'aptitude des sols de l'Oise (RÉMY et BEGON, 1970). Il s'agissait de porter un jugement sur la « valeur agricole » de chaque unité cartographiée (carte pédologique au 1/100 000) et de les ranger dans l'une des quatres classes d'aptitude imposées : sols très favorables, favorables, passables et médiocres.

Les auteurs caractérisent le sol par l'examen de sept propriétés agronomiques

(réserve en eau utile, aération, facilité de travail...). L'importance qu'ils prêtent à chacune d'elles est chiffrée par une note, d'où une série de sept notes pour une unité sol (cf. tabl. 3).

TABLEAU 3

| Sol n° | Propriété n° | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | ------- | 7 |
| 1 | $a_{11}$ | $a_{12}$ | | $a_{17}$ |
| 2 | $a_{21}$ | $a_{22}$ | | $a_{27}$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ |
| $n$ | $a_{n1}$ | $a_{n2}$ | | $a_{n7}$ |

Chaque plante test considérée (céréales, betterave sucrière, prairie permanente...) reçoit de son côté une autre série de sept notes qui traduisent l'importance relative de ces sept propriétés sur la culture de la plante.

TABLEAU 4

| Cult. | Propriété n° | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | ------- | 7 |
| 1 | $b_{11}$ | $b_{12}$ | | $b_{17}$ |
| 2 | $b_{21}$ | $b_{22}$ | | $b_{27}$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ |
| $p$ | $b_{p1}$ | $b_{p2}$ | | $b_{p7}$ |

La première série de notes est donnée par le pédologue, la seconde par l'agronome. Les deux séries de notes sont ensuite combinées en faisant la somme des produits 2 à 2 des notes d'une ligne du tableau 3 par les notes de la colonne correspondante du tableau 4. Ils aboutissent finalement au tableau 5.

TABLEAU 5

| Sol n° | Culture n° | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | ------- | $p$ |
| 1 | $S_{11}$ | $S_{12}$ | | $S_{1p}$ |
| 2 | $S_{21}$ | $S_{22}$ | | $S_{2p}$ |
| ⋮ | | | | |
| $n$ | $S_{n1}$ | $S_{n2}$ | | $S_{np}$ |

*Exemple* : $S_{11} = a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} + \ldots + a_{17}b_{p1}$.

Cette méthode est un exemple d'utilisation très systématique de la relation additive. Elle revient à établir deux matrices de notes et à effectuer leur produit. Les notes de la matrice produit servent de critère unique de classement de chaque sol vis-à-vis de chaque culture.

La relation additive a été également très employée dans les systèmes allemands. Elle n'est pas cependant sans présenter des insuffisances. En effet, on peut obtenir une même valeur de l'indice pour des combinaisons très différentes des notes, ce qui montre que la relation additive implique une compensation possible entre les effets des critères. De telles compensations existent, mais il n'en reste pas moins qu'une relation additive rend mal compte des conditions limitantes. Par exemple, si on considère les trois critères suivants :

| | Note maximale | Note obtenue |
|---|---|---|
| | — | — |
| Conditions du profil ..... | 100 | 100 |
| Texture ..... | 100 | 100 |
| Non accumulation du sel..... | 100 | 10 |
| | 300 | 210 |

L'indice additif total relatif est donc : 210 : 300 = 70 p. 100, alors que l'accumulation de sel est limitante pour la production.

b) *La relation multiplicative*

La relation multiplicative, telle que celle présentée dans l'indice STORIE (1928) représente plus fidèlement la réalité. Dans le même exemple on aurait :

$$\frac{100}{100} \times \frac{100}{100} \times \frac{10}{100} = 10 \text{ p. } 100$$

Un indice multiplicatif peut même s'annuler pour un critère particulièrement défavorable.

c) *On peut également considérer un indice rapport* ayant au numérateur une expression des notes des facteurs favorables et au dénominateur une expression des notes des facteurs défavorables (BLAQUIÈRE, 1969).

Enfin, dans de nombreux systèmes (RIQUIER), les auteurs calculent deux indices qui reflètent respectivement l'aptitude actuelle et l'aptitude potentielle de l'unité terrain. Le rapport de ces deux indices donne alors une mesure du progrès possible.

Les indices présentent l'avantage de supprimer la subjectivité au moment du passage des critères à l'indice global unique. En fait, la subjectivité est déjà intervenue une fois pour toutes au moment de l'attribution des poids relatifs aux critères et du choix de la formulation mathématique de l'indice. Le problème de la subjectivité est donc plus déplacé que résolu et il n'est pas certain que les méthodes basées sur des indices soient meilleures que les précédentes.

## CONCLUSION

Comme il est difficile d'obtenir un classement polyvalent des terres, la forme de tout classement dépend largement des buts poursuivis. Il faut bien comprendre à ce sujet que, quelle que soit la valeur d'une classification, elle a plus pour but de faciliter le choix d'un objectif et les façons possibles de l'atteindre que « d'imposer un plan préconçu d'utilisation ». Une utilisation donnée dépend en définitive de beaucoup d'éléments (besoins, évolution des techniques, de l'économie...) que la classification n'est pas en mesure de prendre en considération.

On distingue habituellement les classifications physiques basées sur les caractéristiques physiques du milieu et les classifications économiques qui utilisent les résultats économiques de l'utilisation du milieu. Les premières présentent l'avantage d'être permanentes ; en fait, ce caractère est de moins en moins strict, compte tenu des possibilités de plus en plus grandes de modifications du milieu. Les secondes présentent l'avantage de tenir compte des conditions du milieu et de son degré d'artificialisation. Cet avantage est obtenu au détriment de la permanence du classement, qui est de moins en moins assurée à cause des changements rapides des conditions économiques et techniques.

En fait, une fois les grands principes définis, le système de classement retenu dépend en grande partie des renseignements dont on dispose :

— contraintes écologiques des diverses productions
— carte des sols
— cartes du climat et de la végétation
— rendements disponibles et utilisables
— études économiques.

Il est rare de disposer de tous ces renseignements. L'urgence des réponses conduit pour l'instant à dresser une première esquisse à partir d'éléments de description du

milieu physique, et à l'améliorer ensuite avec les résultats de l'utilisation du milieu. De nouvelles méthodes basées sur la prise en considération d'un très grand nombre de variables, de modèles de simulation et de techniques statistiques très élaborées, devraient permettre prochainement de proposer des solutions plus satisfaisantes pour la détermination des aptitudes d'une région (XXX, 1968).

*Reçu pour publication en octobre 1971.*

## ANNEXE I

### Le classement des terrains du service de la conservation des sols des États-Unis (klingebiel, 1958 ; aandahl, 1958 ; jacks, 1946 ; odell, 1958 ; vink, 1963 ; soil survey manual, 1951)

*Principes*

— Il a pour objectif principal la lutte contre l'érosion, et pour objectifs secondaires une planification de l'utilisation des terres et la détermination de l'aptitude des terrains à répondre à un ensemble de techniques données.

— Il est construit de manière à répondre aussi bien à des questions très globales au niveau national, qu'à des questions qui se posent à l'agriculteur.

— Il est fondé sur la considération des unités pédologiques (séries de sols, phases et types de sols pour des études de détail) pour lesquelles l'ensemble des informations actuellement connues est noté d'une façon compréhensible pour tous les utilisateurs : conditions climatiques, comportement global vis-à-vis des cultures habituellement pratiquées dans la région, indices globaux (indices Story), localisation et résultats de tests du Génie civil. Cette information permet de classer rapidement les unités de sols en unités d'aptitude.

*Classement des unités pédologiques selon leur aptitude à une utilisation agricole.*

*La classe I :* on y range toutes les unités ayant la plus grande souplesse d'emploi pour une agriculture intensive.

*La classe VIII :* elle renferme tous les terrains pour lesquels les conditions de milieu sont si sévères qu'elles les rendent inaptes à toute utilisation agricole, et qu'il semble donc préférable, dans les conditions actuelles, de réserver à d'autres formes d'utilisation (lieux touristiques, constructions, etc.).

Les classes, autres que la I^re^, sont subdivisées en un certain nombre de sous-classes pour indiquer d'une façon explicite le facteur principal responsable du rejet de la I^re^ classe.

La nomenclature suivante est adoptée :

*e* : le facteur limitant principal est le risque d'érosion sur sol nu,
*w* : il existe un excès d'eau suffisamment important pour empêcher une culture normale,
*s* : la culture est limitée par des facteurs physiques défavorables : épaisseur exploitable par les racines trop faible, sols trop secs, etc.

Pour servir de support à la vulgarisation agricole régionale, les auteurs ont créé *une unité d'aptitude*. Elle peut se définir comme l'ensemble des sols à l'intérieur d'une même sous-classe qui ont les mêmes limitations pour une culture ou un groupe de cultures, justifient les mêmes techniques générales d'exploitation et ont des rendements voisins pour un même niveau d'intensification.

Chaque unité d'aptitude reçoit un symbole qui comprend deux parties :

— la première est le symbole utilisé pour désigner la classe ou la sous-classe à laquelle appartient l'unité,

— la seconde est un chiffre de 1 à 5 précisant le facteur limitant principal :

1. érosion actuelle ou potentielle ;
2. limitation de l'enracinement par une nappe permanente à faible profondeur ;
3. limitation de l'enracinement en raison d'une épaisseur de sol utile faible ;
4. problèmes liés à des textures trop grossières ;
5. problèmes liés à des textures trop fines.

Par exemple, on considère les unités suivantes : III *w* — 1 ; I — 1 ; III *e* — 3, etc...
A chaque unité d'aptitude est rattaché un ensemble de conseils d'utilisation agricole.

*Utilisation*

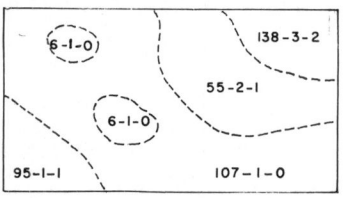
Classes et sous-classes permettent de montrer dans leur généralité l'étendue et la gravité des problèmes qui se posent pour l'agriculture des États-Unis, en particulier sous l'angle de la conservation des sols.

Un agriculteur disposant de la notice explicative accompagnant toute étude pédologique, peut savoir rapidement à quelles unités d'aptitude appartiennent ses sols, quels en sont les qualités et défauts principaux, les cultures qui ont toutes les chances de réussir dans les conditions actuelles, et quelles sont les techniques à respecter pour conserver son capital terre.

Pour connaître les rendements qu'il peut obtenir d'une parcelle donnée, il procédera de la façon suivante (exemple emprunté à une étude faite dans l'État du Iowa (SHRADER, 1960)) :

La notice explicative distingue 67 unités cartographiées (types et phases de sol). Pour chacune d'elles, et pour les principales plantes de la région, les auteurs donnent deux valeurs de rendement avec leurs marges de variation correspondant à deux niveaux d'intensification possibles. Ces deux niveaux sont définis de la façon suivante, par exemple pour le soja :

— Pour le haut niveau il faut, entre autres exigences, que la rotation inclue une prairie temporaire au moins une année sur cinq, et que les apports en éléments majeurs soient au moins égaux aux quantités fixées par l'agronome pour l'unité de sol considérée.
— Pour le bas niveau ces exigences ne sont pas satisfaites.




| Unité cartographiée | Nom de la série de sol | Pente % | Érosion | Surface (ha) |
|---|---|---|---|---|
| 6-1-0 | Glencoe silty clay loam | 1 | nulle | 0,50 |
| 55-2-1 | Nicollet loam | 2 | légère | 3,90 |
| 95-1-1 | Harpster clay loam | 1 | légère | 1,00 |
| 107-1-0 | Webster silty clay loam | 1 | nulle | 7,60 |
| 138-3-2 | Clarion loam | 3 | modérée | 3,20 |
| | | | | 16,20 |

FIG. 3

On dispose du tableau suivant : cf. tableau 1.

Ces chiffres repères ont été établis au niveau de la région en faisant un certain nombre d'hypothèses. Ils doivent être ensuite ajustés aux conditions locales pour permettre l'estimation du rendement de chaque type de culture en un point quelconque du territoire. On introduit un certain nombre de corrections :

— effet du progrès technique sur les rendements, estimé à 60-70 kg/ha/an.
— effet de la position géographique sur les rendements : si l'unité de sol occupe une grande superficie, les conditions climatiques ne peuvent plus être considérées comme constantes.

TABLEAU I

| N° unité | Type de sol | Pente % | Érosion (indice) | Association de sols | Fertilisation optimale (ex : maïs) | | | Estimation du rendement (haut niveau) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | N (kg/ha) | $P_2O_5$ (kg/ha) | $K_2O$ (kg/ha) | maïs (q/ha) | soja (q/ha) | avoine (q/ha) | foins (t/ha) |
| 156 | Albaton silty clay and clay | 0-1 | 0 | B | 75 | 10 | 0 | 30-35 | 13-17 | 11-15 | 4.5-6.0 |
| 138 | Clarion loam . . | 2-5 | 1 | CW | 110 | 70 | 20 | 45-50 | 18-20 | 23-25 | 7.5-9.0 |
| 783 | Cresco loam . . . | 2-5 | 1 | CKC | 90 | 65 | 60 | 35-40 | 13-17 | 15-18 | 6.0-7.0 |
| 192 | A dair silty clay loam . . . | 5-9 | 2 | SSE, SGH, SSW | 125 | 50 | 0 | < 20 | — | < 11 | < 3 |

TABLEAU 2

| Unité de sol | Ajustement en % pour : | | | | | | | | Ajustement total (%) | Rdt ajusté (kg/ha) | Surface (ha) | Rdt (q × surf.) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Rdt moyen q/ha maïs (HN) | Pente | Érosion | Drainage | Rotation | Situation géogr. | Fertilisation | Management | | | | |
| 6-1-0 | 39 | 0 | 0 | — 50 | 0 | + 5 | 0 | — 10 | — 55 | 18 | 0,50 | 9 |
| 55-2-1 | 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | + 5 | 0 | — 10 | — 5 | 48,5 | 3,90 | 187 |
| 95-1-1 | 39 | 0 | 0 | — 10 | 0 | + 5 | — 10 | — 10 | — 25 | 29 | 1,00 | 29 |
| 107-1-0 | 49 | 0 | 0 | — 15 | 0 | + 5 | 0 | — 10 | — 20 | 39 | 7,60 | 281 |
| 138-3-2 | 47 | — 5 | — 5 | 0 | 0 | + 5 | 0 | — 10 | — 15 | 40 | 3,20 | 120 |
| Non cultivable | 0 | 0 | | | | | | | | | 0,60 | 0 |
| | | | | | | | | | Totaux | | 16,80 | 625 |
| HN : haut niveau | | | | | | | | | Rendement théoriquement réalisable sur la parcelle (q/ha) | | | 38 |

On introduit une correction en fonction de la latitude (60-70 kg/ha pour 24 km du sud au nord), et une correction en fonction de la longitude (60-70 kg/ha pour 40 km d'est en ouest).
— effet de la pente.
— effet de l'épaisseur de sol utile : on fait une correction pour les sols érodés.
— effet du système cultural : indice 100 pour la rotation type, et correction pour les autres rotations.
— effet niveau fertilisation : la comparaison entre les fertilisations recommandées et celles effectivement utilisées permet d'apprécier le manque ou le gain de rendement.
— effet d'un certain nombre d'autres facteurs qui interviennent plus localement.

C'est ainsi que pour une parcelle donnée comportant cinq séries de sol (fig. 3), il est possible de calculer le rendement théorique qu'on peut escompter en une culture, par exemple le maïs (tabl. 2).

## ANNEXE 2

### Le système du département de la conservation des sols d'Israël (shteckelmacher, 1966))

**Un système** de classement de terrains a été établi en 1964 sur tout le territoire d'Israël, dans le but de planifier l'utilisation des terres au niveau national. D'autres classements, fondés sur les mêmes principes mais plus détaillés, permettent pour chacun des huit districts du pays une planification à la fois au niveau du district et des fermes collectives.

Ce système est fondé sur la prise en considération des facteurs les moins modifiables : climat et sols, et sur la définition d'une « culture adaptée ».

#### *Climat*

Chacun des districts est considéré comme une unité climatique homogène. Si cela n'est pas possible, certains districts sont subdivisés en sous-districts. Au niveau national, on distingue ainsi 17 districts ou sous-districts représentant donc 17 unités climatiques. Pour les études détaillées, d'autres renseignements climatiques sont réunis : carte « d'isodanger » de gel dans les régions d'arboriculture, certaines nuances régionales dans les températures et précipitations moyennes, etc.

#### *Sols*

Établissement d'une carte pédologique au 1/20 000 pour l'étude nationale, au 1/10 000 pour les études de districts.

• Pour l'étude nationale :

Exemple : unité de sol n° 1 : sols à textures moyennes à fines, modérément ou peu perméables avec une pente inférieure à 6 p. 100.
1 *a* : pas ou peu de calcaire (moins de 3 p. 100 de $CaCO_3$ total)
1 *b* : calcaire (3-25 p. 100)
1 *c* : très calcaire (> 25 p. 100)
1 *d* : sols des basses terrasses de la vallée du Jourdain.

• Pour l'étude détaillée, on subdivise chacune de ces unités. Ex. : pour 1 *b*:

1 *b* (2) : modérément perméable
1 *b* (3) : peu perméable
1 *b* (*f*) : surfaces soumises à des gelées
1 *b* (*s*) : salé (2 à 4 millimohs/cm)
1 *b*(*ss*) : très salé (> 4 millimohs/cm)

*Définition d'une « culture adaptée »*

Pour les auteurs, une culture rentre dans la liste des cultures de l'unité d'aptitude X, si elle couvre au moins les frais de production. C'est aux économistes de préciser à partir de quels rendements (en culture irriguée ou sèche) cette culture couvre ses frais de production.

Les agronomes dressent par ailleurs la liste des critères les plus importants à respecter pour chaque plante.

Exemple : Oranges Shamouti, dans une région donnée, en culture irriguée :

*Texture :* limon sableux à limon argileux, c'est-à-dire de 5 à 70 p. 100 d'argile et de 5 à 30 p.100 de limon.

*Épaisseur de sol :* au moins 120 cm si l'eau d'irrigation contient moins de 170 mg/l de chlorure, au moins 150 cm si l'eau d'irrigation contient plus de 170 mg/l de chlorure.

*Présence d'un horizon imperméable, d'un horizon caillouteux :* facteurs limitants.

*Pente :* moins de 15 p. 100.

*Topographie :* pas de limitation.

*Nappe phréatique :* à plus de 3 m.

*Salinité :* moins de 2 millimohs/cm.

*pH :* inférieur à 8.

*Précipitations :* pas de limitation.

*Susceptibilité au gel* : forte.

*Altitude :* 100 m, etc...

Il est intéressant d'indiquer les différentes étapes de la confection de la carte :

— délimitation des unités sols à l'échelle du 1/20 000,
— définition d'un groupe de cultures adaptées à chaque unité de sols.

Ces documents servent de base à une concertation au niveau du district, où sont présents d'une part les ingénieurs de la conservation des sols et d'autre part ceux du service de vulgarisation et de l'irrigation. Des modifications sont ainsi apportées aux documents initiaux à la lueur des opinions de ces experts locaux.

— Les documents révisés sont alors proposés pour discussion aux directeurs des départements des diverses branches de production du Ministère de l'Agriculture. La décision de ces experts est prise comme solution définitive.

De ce travail, résulte le découpage de la région en « unités d'aptitude » : une unité d'aptitude regroupe, pour un climat donné, tous les sols aptes à une même liste de cultures adaptées.

Au niveau national on a distingué empiriquement 32 unités d'aptitude. Pour les études de district, on va plus loin et à chaque unité sont rattachées une ou deux listes de cultures adaptées à cette unité :

— une liste des plantes qui sont adaptées dans l'état actuel de mise en valeur ;
— éventuellement, une liste pour l'ensemble des plantes adaptées à l'unité, après certains aménagements ou l'introduction de nouvelles techniques.

Chaque unité reçoit un symbole chiffré comprenant le numéro de l'unité, sa superficie, et un nombre qui renvoie à la liste des cultures adaptées.

Ce nombre varie de 1 à 99 pour les cultures irriguées,
de 101 à $x$ pour les cultures sèches.

Exemple : $\frac{(28)\ 21}{12}\Big|\frac{11}{}$ Unité d'aptitude n° 11 ; superficie de 12 ha.

Avec aménagement agricole, elle est adaptée aux cultures du groupe 21, sans aménagement au groupe 28.

*Utilisation*

Le système est utilisable par les fermes collectives qui, comparant l'utilisation actuelle de leurs sols avec le modèle proposé, peuvent selon leurs possibilités de financement, leurs moyens techniques et leur compétence, s'en rapprocher.

Il est également utilisable par les responsables régionaux ou nationaux qui peuvent connaître, grâce à des sommaires, la surface convenant théoriquement à une culture donnée et la surface réellement consacrée à cette culture.

A chaque instant, il est possible de rajouter ou d'enlever, selon la conjoncture économique, une ou plusieurs cultures des listes, sans modifier fondamentalement les unités d'aptitude. Enfin, signalons que toutes les données sont sur cartes perforées et que l'automatisation du traitement de cette information est poussée au maximum.

## SUMMARY


### SOIL GRADING

The soils which are amenable to very versatile uses constitute a wealth which should be managed in the best interests of the community. Thus, in the distribution of soils, the requirements of any given application and the suitability of the soils for the various uses should be taken into account.

The study of the suitability of soils for a given application, in particular for agriculture, becomes more and more important.

Numerous soil grading methods have been proposed. The purpose of this restatement is to study said methods so as to derive the main principles they involve. The common points of these methods may also be evinced, in particular physical grading based on the characteristics of the medium may be differentiated from grading on an economic base which uses the results of medium development.

Two very elaborate soil grading methods are appended hereto by way of example.


## ZUSAMMENFASSUNG


### DIE KLASSIFIZIERUNG DER BÖDEN

Die Böden, die sehr verschieden verwendet werden können, stellen einen Wert dar, der im Interesse der Gemeinschaft bestens ve waltet werden muss. Infolgedessen muss die Verteilung der Böden den Bedürfnissen, die bei einer gegebenen Ausnutzung auftreten und für eine Eignung der Böden zu verschiedensten Verwendungen gelten, Rechnung tragen.

Die Untersuchung der Eignung der Böden für eine gegebene Ausnutzung, in bessondere für die Landwirtschaft, gewinnt jeden Tag mehr an Bedeutung.

Zahlreiche Klassifizierungssysteme für Böden wurden vorgeschlagen. Das Ziel dieser Ausarbeitung besteht darin, diese Systeme zu untersuchen, um die allgemeinen Grundsätze, die sie enthalten, hervorzuheben. Man kann auch die gemeinsamen Merkmale dieser Systeme hervor heben und insbesondere die physikalischen Klassifizierungen, die sich auf die Milieueigenschaften Stützen, von denjenigen mit ökonomischer Prägung, die ie Ergebnisse der Milieusausnutzung behandeln, unterscheiden.

Zwei sehr ausgearbeitete Klassifizierungssysteme für Böden werden als Beispiel in der Anlage gegeben.


## РЕЗЮМЕ


### Классификация земель.

### А. МАРЕН-ЛАФЛЕШ.

Земли, предназначенные для какого-либо освоения, являются ценностью, располагать которой можно, только строго соблюдая интересы коллектива. Это означает для их определенного применения нужно принимать во внимание нужды коллектива и пригодность этих земель для выбранных целей.

Изучение этой пригодности для различных целей, и в частности, для сельского хо зяйства, представляет все больший интерес.

Существует много систем классификации земель и целью данной работы является изучение этих систем и определение их общих принципов. Возможно также выделить общие начала этих систем и, в частности, отличить классификации физические, основанные на характерностях среды, от классификаций опирающихся на экономические базы и использующих результаты применения среды.

В приложении даются примеры этих двух, сильно разработанных систем классификации земель.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


AANDAHL A. R., 1958. Soil survey interpretation. Theory and purpose. *Soil Sci. Soc. Americ. Proc.*, **22** (2), 152-157.

ABLEITER J. K., 1940. Productivity ratings of soil types. *Missouri Agric. Expt. Sta. Bull.*, **421**, 13-24.

BLAQUIÈRE C., MÉRIAUX S., 1969. Relation entre les appellations d'origine du Vignoble blanc de la Côte de Beaune et certains caractères édaphiques. *C R. Acad. Agric. Fr.*, **55**, 1065-1077.

BRETON M., 1962. A propos de l'expression : vocation naturelle. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **48**, 812-817.

DABIN B., 1962. Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux. *Ann. agron.*, **13** (2), 111-140.

GRIFFITH D. J., CRACKNELL B. E., 1965. *Study group on agricultural land classification* (first progress report). Ministry of agriculture, fisheries and Food, London, 23 p.

JACKS G. V., 1946. *Land classification for land use planning.* Imperial Bur. soil Sci., England, Techn. comm. 43, 90 p.

HUDSON G. D., 1936. The unit area method of land classification. *Ann. Assoc. Americ. geogr.*, **26**, 99-112.

KELLOGG C. E., 1937. *Soil survey manual.* U. S. D. A., Misc. Pub., 274.

KELLOGG C. E., 1935. A systeme of land classification. *Trans. Third Internat. Cong. Soil Sci.*, **1**, 283-286.

KELLOGG C. E., 1940. The theory of land classification. I. The contribution of soil science and agronomy to rural land classification. *Missouri Agric. Expt. Sta. Bull.*, **421**, 164-173.

KENDALL M. G., 1939. The geographical distribution of crops productivity in England. *J. Roy. Stat. Soc.*, **102**, 21-62.

KLINGEBIEL A. A., 1958. Soil survey interpretation. Capability groupings. *Soil Sci. Soc. Americ. Proc.*, **22** (2), 152-157.

LANGLET A., BLANCHET R., 1969. Essai d'appréciation des potentialités de production des principaux milieux naturels de la région Midi-Pyrénées. I. Méthodes d'étude. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **55**, 714-729

MALASSIS L., 1966. Croissance économique et espace rural. *Cah. Centre nation. Expos. Concours agric.* nº spécial, 19-29.

MARBUT C. F. Land classification. *Soil Sci. Soc. Americ., Life and work of C. Marbut*, 271 p.

MONNIER G., 1966. Le concept de sol et son évaluation. *Sci. sol* (1), 89-111.

MULCAHY M. J., HUMPHRIES A. W., 1967. Soil classification, soil surveys and land use. *Soils Fertil.*, **30** (1), 1-7.

NOSTITZ A. VON, 1929. *Praktische Boden untersuchung und Bodenbeurteilung.* Paul Parey Edit., 146 p.

ODELL R. T., 1958. Soil survey interpretation. Yield prediction. *Soil Sci. Soc. Americ. Proc.*, **22** (2), 152-157.

RÉMY J.-C., BEGON J.-C., 1970. *Projet d'un système de classement d'aptitude des sols de l'Oise* (non publié).

RIQUIER J., CORNET J.-P. *Nouveau système de classification des terres et de cartographie en vue de leur utilisation* (1re approximation), application aux cartes des ressources en sol. FAO, Rome.

SHRADER W. D., SHALLER F. W., 1960. Estimated crop yields on Iowa soils. *Iowa St. univers. Sci. Techn.*, special report 25.

SHTECKELMACHER S., 1966. *Land use and crop adaptation survey.* Israel, ministry of Agric., Soil conserv. Depart., 35 p.

SMITH G. D., 1965. Lectures on soil classification. *Pédologie*, 4, 5-121.

STORIE R. E., 1933. An index for rating the agricultural value of soils. *Calif. Agric. Expt. Sta. Bull.*, **556**.

VEATCH J. O., 1941. Agricultural land classification and land types of Michigan. *Mich. Agric. Expt. Sta. Bull.*, **231**.

VINK A.-P.-A., 1963. *Aspect de pédologie appliquée.* A la Baconnière, Neuchâtel édit., 174 p.

XXX, 1951. *Soil survey manual.* U. S. Dept. Agric., Handbook , **18**, 503 p.

XXX, 1968. *Land évaluation.* Papers of a C. S. I. R. O. symposium, UNESCO, Canberra, 26-31, 392 p.

XXX, 1967. *Land utilisation in eastern Europe.* Akademia Kiado, Budapest, 88 p.

XXX, 1966. *Soil surveys and land use planning.* Americ. Soc. Agron., 196 p.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (1), 31-49.

# UNE MÉTHODE PRATIQUE DE CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

P. BROCHET et N. GERBIER

*Météorologie nationale,*
*2, avenue Rapp, 75 - Paris (7e)*

## NOTE DE LA RÉDACTION

La rédaction des *Annales* est heureuse de présenter cette mise au point que M. BROCHET, Chef du service de Climatologie de la Météorologie nationale, et M. GERBIER ont réalisée à la suite d'une étroite collaboration avec les départements d'Agronomie et de Bioclimatologie de l'I. N. R. A. Le lecteur y recherchera moins une formule nouvelle de l'évapotranspiration potentielle s'ajoutant à tant d'autres, qu'un mode de calcul logique, pratique et facilement réalisable sur la base des données météorologiques de réseau. Les données obtenues par la méthode ainsi décrite sont celles qui figurent dans l'*Atlas de la Météorologie nationale* sous forme de normale mensuelle, celles que l'on est également susceptible d'obtenir auprès d'un réseau météorologique de plus en plus appelé à assurer auprès de l'agriculture un service d'assistance.

## RÉSUMÉ

Dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle, en partant de l'expression du bilan énergétique établie par PENMAN, on aboutit à une formule de la forme : $ETP = m\ R_g + n\ E_p$, ne faisant intervenir comme paramètres atmosphériques que le rayonnement global et l'évaporation mesurée sous abri à l'aide du Piche.

On montre que les coefficients $m$ et $n$ sont essentiellement fonctions de la latitude et de la saison.

En vue d'une utilisation opérationnelle de cette formule, la valeur du rayonnement global, ou à défaut de la durée d'insolation, peut être fournie par la station météorologique la plus représentative de la zone climatique considérée, tandis que la mesure du « Piche », caractérisant le microclimat, est à la portée de tout utilisateur, sous réserve de certaines précautions (type d'abri, emplacement du Piche).

## SYMBOLES UTILISÉS

| | |
|---|---|
| $r$ | albedo du sol |
| $E_a$ | pouvoir évaporant de l'air |
| $E_p$ | évaporation mesurée à l'aide du Piche en mm |
| $e$ | tension actuelle de la vapeur d'eau en mb |
| $e_w$ | tension maximale de la vapeur d'eau en mb |
| $e'_T$ | pente de la courbe des tensions maximales de la vapeur d'eau |
| $h$ | durée d'insolation |
| H | durée du jour |
| $I_{GA}$ | rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère |
| L | chaleur latente d'évaporation |
| $R_a$ | rayonnement de l'atmosphère (spectre IR) |
| $R_g$ | rayonnement solaire global en cal. $cm^{-2}$ $mn^{-1}$ |
| $R_n$ | rayonnement net en cal. $cm^{-2}$ $mn^{-1}$ |
| $R_t$ | rayonnement du sol en cal. $cm^{-2}$ $mn^{-1}$ |
| T | température de l'air sous abri en °K |
| $T_d$ | température du point de rosée en °K |
| $\alpha$ | coefficient de la formule du Piche corrigé |
| $\lambda(T)$ | rapport $e'_T/\gamma$ |
| $\gamma$ | constante psychrométrique |
| $\sigma$ | constante de Stefan-Boltzman. |

L'évapotranspiration potentielle, ETP, est l'un des paramètres climatiques essentiels que doit suivre en permanence le responsable d'une exploitation agricole désirant contrôler l'approvisionnement hydrique de ses spéculations végétales afin de leur assurer une croissance ou un développement optimal. Le choix judicieux des systèmes et des procédures d'irrigation ainsi que les résultats économiques que l'on peut en escompter découleront directement de la précision avec laquelle le pouvoir évaporant de l'environnement atmosphérique aura été apprécié. La mesure directe de l'ETP se révèle non seulement onéreuse mais très délicate même pour des techniciens avertis en raison d'une part, de la difficulté d'apprécier en temps réels les transferts d'eau dans le sol et, d'autre part, de l'incertitude concernant la fidélité du capteur végétal et son maintien à un niveau d'activité biologique constant. Toutefois des mesures de référence précises sont nécessaires et le département de bioclimatologie de l'I. N. R. A., au cours de son programme d'étude très général sur les échanges d'eau entre la plante et son environnement, a mis au point des évapotranspiromètres pesables dont la précision permet de suivre quotidiennement ces échanges.

Dans le but de pallier cette déficience dans la densité des mesures d'évapotranspiration, de nombreux auteurs se sont attachés à cerner la valeur de l'ETP à l'aide de calculs résultant soit d'ajustements statistiques soit de l'application de lois physiques ou dynamiques et basés sur des données atmosphériques facilement accessibles.

Parmi ces approches, l'estimation du bilan énergétique au niveau du végétal, adoptée en particulier par PENMAN (1948), s'avère assez satisfaisante quand on compare les valeurs ainsi obtenues aux mesures réalisées à l'aide de cases lysimétriques bien conduites. Les écarts par rapport aux mesures excèdent rarement 20 p. 100 pour des intervalles décadaires, ainsi que le montre le tableau 1 établi en comparant, par décades, des mesures effectuées dans des centres de l'I. N. R. A.:

La Minière, Région parisienne ; Montfavet, Région d'Avignon (vallée du Rhône), à l'aide d'évapotranspiromètres pesables recouverts de fétuque manade et des estimations calculées par la méthode de « PENMAN » à partir de données climatiques prélevées à proximité des cases lysimétriques.

TABLEAU I

*Écarts relatifs décadaires entre la mesure de l'ETP et l'estimation* PENMAN

(semestre avril-septembre)

| Écarts relatifs décadaires | ⩽ 5 % | ⩽ 10 % | ⩽ 15 % | ⩽ 20 % | ⩽ 25 % | ⩽ 30 % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fréquence des cas (%) | 30 | 65 | 76 | 93 | 96 | 98 |

On doit noter que les écarts les plus élevés (> 20 p. 100) correspondent en général à des valeurs de l'ETP relativement faibles.

En valeur mensuelle, les écarts relatifs figurent dans le tableau 2. Dans tous les cas, ces écarts sont exprimés sous la forme $\frac{C - M}{M}$, C étant la valeur calculée et M la valeur mesurée.

Le signe + indique donc une surestimation du calcul. Notons que pour les calculs de l'ETP PENMAN, nous avons été amenés à estimer la tension moyenne de la vapeur d'eau à partir des seules données d'humidité alors disponibles sur support magnétique, à savoir : les humidités relatives quotidiennes extrêmes. Un tel procédé introduit une certaine incertitude.

Il y a d'ailleurs d'autres causes de disparité résultant de l'utilisation de cette méthode car, dans le souci d'aboutir à une expression maniable dans la pratique, les auteurs ont été amenés à adopter un certain nombre d'hypothèses simplificatrices concernant en particulier les processus de transfert de chaleur et de vapeur d'eau au niveau de la couche limite.

TABLEAU 2

*Écarts relatifs mensuels entre ETP calculée* PENMAN *et ETP mesurée*

| Mois | Montfavet, 1968 (%) | Montfavet, 1969 (%) | La Minière, 1969 (%) |
|---|---|---|---|
| Avril ..... | + 15 | — 12 | + 3 |
| Mai ..... | — 4 | — 10 | + 14 |
| Juin ..... | — 2 | — 3 | — 3 |
| Juillet..... | + 5 | — 1 | — 9 |
| Août ..... | + 12 | — 12 | — 8 |
| Septembre ..... | + 13 | — 14 | — 11 |

## I. — ÉQUATIONS DE PENMAN ET DU PICHE CORRIGÉ

Dans sa forme théorique, l'expression proposée par PENMAN,

$$\text{ETP (PEN.)} = R_n \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)} + E_a \cdot \frac{1}{1 + \lambda(T)} \qquad (1)$$

fait apparaître deux termes :

Le premier :

$$R_n \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)}$$

représente la participation des échanges radiatifs à l'ETP, tandis que le second :

$$E_a \cdot \frac{1}{1 + \lambda(T)}$$

dépend essentiellement des propriétés physiques intrinsèques de l'air et figure la contribution de l'advection au potentiel évaporant de l'environnement atmosphérique.

L'estimation pratique de chacun de ces termes ne va pas sans difficultés. Dans le terme radiatif, le rayonnement net n'est pratiquement pas accessible à la mesure directe et dans le terme advectif, le pouvoir évaporant de l'air $E_a$ dépend non seulement du déficit de saturation $(e_w - e)$, que l'on peut assez facilement calculer, mais également du coefficient de diffusivité de la vapeur d'eau, lequel est une fonction complexe du vent plus difficile à interpréter.

Aussi a-t-on été amené à remplacer chacun des termes de la formule initiale par une expression approchée ne faisant intervenir que des éléments climatiques pour lesquels on peut disposer de mesures.

Dans le premier terme de l'expression (1) :

$$\varphi(R_n) = \frac{R_n}{L} \cdot \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)} \qquad (2)$$

le rayonnement net peut être exprimé à partir du bilan radiatif :

$$R_n = (1 - r)\, R_g + R_a - R_T$$

ou

$$R_n = (1 - r)\, R_g - (R_T - R_a)$$

Généralement les éléments de ce bilan ne peuvent être mesurés directement mais sont à leur tour estimés à l'aide de formules approchées. Pour le rayonnement global, $R_g$ , la densité du réseau pyranométrique étant insuffisante ou l'implantation trop récente, on utilisera dans la suite de cet exposé la formule de Black qui, à l'aide d'un ajustement linéaire, relie d'une façon très satisfaisante la valeur du rayonnement global à la fraction d'insolation $h/H$ :

$$R_g = I_{GA} \left( a + b \frac{h}{H} \right)$$

$I_{GA}$, rayonnement solaire par unité de surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère et H, durée du jour, sont des données qui figurent sur des tables

astronomiques, tandis que $h$, durée réelle d'insolation, est mesurée dans un assez grand nombre de sites (une centaine en France, voir fig. 4).

Les coefficients $a$ et $b$ sont déterminés statistiquement par la méthode des moindres carrés. En France, on adopte généralement :

$$a = 0{,}18$$
$$b = 0{,}62$$

En ce qui concerne le bilan radiatif de grandes longueurs d'ondes (infrarouge) de l'atmosphère et du sol, différentes expressions de la forme :

$$R_T - R_a = \sigma T^4 \varphi(A_t)$$

ont été proposées, dans lesquelles $\varphi(A_t)$ représente une fonction de facteurs atmosphériques autres que la température et en particulier : humidité et insolation.

Dans ces conditions l'expression (2) peut s'écrire :

$$\varphi(R_n) = [(1 - r)R_g - \sigma T^4 \varphi(A_t)] \frac{1}{L} \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)}$$

Pour expliciter $\varphi(A_t)$, nous avons adopté l'ajustement utilisé dans la formule de Brunt :

$$\varphi(A_t) = (0{,}56 - 0{,}08 \sqrt{e}) \left(0{,}10 + 0{,}90 \frac{h}{H}\right)$$

Le second terme de l'expression de PENMAN demande également a être développé :

$$\varphi(E_a) = E_a \frac{1}{1 + \lambda(T)}$$

$E_a$, pouvoir évaporant de l'air, peut être représenté en fonction du déficit de saturation et d'un facteur de diffusion de la vapeur d'eau lié à l'agitation de l'air, donc au vent :

$$E_a = (e_w - e)\varphi(V)$$

on a donc :

$$\varphi(E_a) = (e_w - e) \cdot \varphi(V) \cdot \frac{1}{1 + \lambda(T)}$$

PENMAN a proposé pour $\varphi(V)$ un ajustement linéaire de la vitesse du vent que nous avons adopté dans les calculs d'évapotranspiration et qui se présente sous la forme :

$$\varphi(V) = 0{,}26 (1 + 0{,}4 V)$$

V étant la vitesse du vent mesurée à 10 m au-dessus du sol et exprimée en $ms^{-1}$.

Finalement la formule de PENMAN développée se présente comme suit :

$$ETP = [I_{GA} (1 - r) \left(0{,}18 + 0{,}62 \frac{h}{H}\right) - \sigma T^4 (0{,}56 - 0{,}08 \sqrt{e})$$

$$\left(0{,}10 + 0{,}90 \frac{h}{H}\right) \frac{1}{L} \cdot \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)} + \frac{1}{1 + \lambda(T)} \cdot 0{,}26 (e_w - e) (1 + 0{,}4 V) \qquad (3)$$

C'est à partir de cette expression qu'ont été réalisés un certain nombre de traitements statistiques (BROCHET et GERBIER, 1970) relatifs aux valeurs décadaires de l'ETP.

Son utilisation implique la mesure d'un certain nombre de facteurs climatiques : durée d'insolation, température, humidité, vent, qui ne sont pas toujours disponibles au niveau d'une exploitation agricole où l'on cherche à estimer l'ETP. Tenant compte de ces restrictions, BOUCHET (1964) a proposé une formulation plus simple ne mettant en jeu qu'un nombre limité de données atmosphériques plus faciles à rassembler : évaporation Piche, températures extrêmes et point de rosée. BOUCHET applique la méthode du bilan énergétique au niveau de la surface évaporante du Piche sous abri, c'est-à-dire, dans des conditions de rayonnement net pratiquement nul. L'évapotranspiration potentielle est alors représentée par l'expression :

$$ETP = \alpha\, E_p[1 + \lambda(\theta)] \qquad (4)$$

dans laquelle $\alpha$ est un coefficient de la forme :

$$\alpha = K_1 \cdot \alpha_0$$

et

$$\theta = \frac{T + T_d}{2}$$

— $K_1$ est un coefficient instrumental lié aux différences de ventilation entre l'intérieur de l'abri et son environnement atmosphérique immédiat, ainsi qu'à la nature de la surface évaporante et dépend par conséquent du type d'abri et du type d'évaporomètre ;

— $\alpha_0$, un paramètre climatique fonction de l'aridité moyenne et qui traduit la relation entre $R_n$ et $E_a$ au cours de la période d'estimation de l'ETP.

L'expérience montre que cette formule dite du « Piche corrigé » exige dans son application des précautions attentives pour deux raisons principales :

1° La mesure de l'évaporation à l'aide du Piche nécessite une certaine rigueur quant à la mise en œuvre du capteur. Il convient tout d'abord d'utiliser un abri normalisé, le coefficient instrumental $K_1$ pouvant varier du simple au double entre deux types d'abri (par exemple abri AMPS et abri bois Grand modèle MN) ; d'autre part, l'installation du Piche à l'intérieur de l'abri lui-même et la disposition des autres appareils (en particulier des enregistreurs volumineux) sont susceptibles d'altérer les mesures. C'est ainsi que dans l'abri en bois grand modèle on a mis en évidence des écarts de l'ordre de 20 p. 100, suivant la position du Piche.

2° Pour ce même type d'abri, le coefficient $\alpha$ varie considérablement (de 0,20 à 0,55 en France, BROCHET et GERBIER, 1968) en fonction des caractéristiques climatiques et en particulier de l'aridité, comme l'indique la formule proposée par l'auteur, de sorte que l'emploi de valeurs moyennes décadaires ou mensuelles pour ce coefficient ne conduit pas toujours à des résultats totalement satisfaisants.

Dans le but d'affiner la précision des résultats en différenciant les valeurs du coefficient $\alpha$ par rapport à l'aridité, SCHOCH (1967) a établi une liaison statistique associant la valeur de ce coefficient $\alpha$ à la différence $(t_n\text{-}t_d)$ entre la température minimale de l'air et la température moyenne quotidienne du point de rosée, différence qui peut caractériser l'aridité d'une région.

Dans le même esprit, BROCHET et GERBIER (1968) ont adopté un ajustement linéaire de ce même coefficient $\alpha$ à un indice climatique de la forme :

$$I_c = K_2 \frac{R_g}{e_w - e}$$

Dans l'application opérationnelle de la formule du Piche corrigé, on peut craindre que certains utilisateurs, ne tenant pas suffisamment compte des causes d'incertitudes inhérentes à la simplicité même de la méthode, déduisent de leurs estimations des conclusions d'ordre agronomique erronées.

Cependant le Piche étant un instrument simple et peu onéreux, réagissant aux conditions locales de vent, du déficit de saturation et de températures, il paraît judicieux de maintenir ses indications dans un calcul d'ETP.

## II. — DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE

Dans le but de mettre à la disposition des usagers agricoles un outil de travail aussi facile à manier que la formule du « Piche corrigé » mais plus représentatif des conditions générales tout en conduisant à des résultats suffisamment précis à l'échelle des interventions agricoles, on a cherché à mettre au point une expression réduisant en particulier la participation du Piche dans l'estimation de l'ETP au profit du rayonnement global, auquel est substituée en l'absence de mesures pyranométriques, la durée d'insolation.

Dans cette optique, on reprend les deux termes de la formule de PENMAN :

$$\text{ETP} = \varphi(R_n) + \varphi(E_a)$$

tels qu'ils ont été précédemment explicités.

*Examen du terme* $\varphi(R_n)$

$$\varphi(R_n) = [(1 - r)R_g - \sigma T^4 \varphi(A_t)] \frac{1}{L} \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)}$$

qui peut encore s'écrire :

$$\varphi(R_n) = R_g \left[1 - \frac{\sigma T^4 \varphi(A_t)}{R_g(1 - r)}\right] \frac{1 - r}{L} \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)}$$

Dans cette expression, $\varphi(R_n)$ se présente comme une fonction du rayonnement global, assorti d'un coefficient correctif et que l'on peut mettre sous la forme :

$$\varphi(R_n) = m \cdot R_g$$

avec

$$m = \left[1 - \frac{\sigma T^4 \varphi(A_t)}{R_g (1 - r)}\right] \frac{1 - r}{L} \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)}$$

ou encore, en exprimant, comme il a été signalé plus haut (3), $R_g$ en fonction de la durée d'insolation et $\varphi(A_t)$ en fonction de la tension de vapeur d'eau et de la fraction d'insolation :

$$m = \left[1 - \frac{\sigma T^4}{I_{GA}(1 - r)} (0{,}56 - 0{,}08\sqrt{e}) \left(\frac{0{,}10 + 0{,}90\ h/H}{0{,}18 + 0{,}62\ h/H}\right)\right] \frac{1 - r}{L} \cdot \frac{\lambda(T)}{1 + \lambda(T)} \quad (5)$$

Le rapport : $\dfrac{0{,}10 + 0{,}90\ h/H}{0{,}18 + 0{,}62\ h/H}$ qui, théoriquement, peut varier de 0,55 à 1,25 quand on passe d'un ciel totalement couvert à une insolation continue, se situe en fait entre des limites beaucoup plus étroites (1,0 à 1,2) pour des intervalles de plusieurs jours (échelle hebdomadaire ou décadaire) du printemps à l'automne.

$I_{GA}$ est une grandeur astronomique, donc liée à la date (maximum en juin) et à la latitude. Par ailleurs $e$ et $\lambda(T)$ présentent un maximum au cours de l'été. On peut donc s'attendre, en moyenne, à trouver pour ce coefficient « $m$ » des fluctuations locales présentant une allure sinusoïdale dont le point haut devrait se localiser dans la période estivale.

En vue de contrôler cette hypothèse et de rechercher avec quel degré de confiance on pourrait définir pratiquement, en chaque site géographique, une valeur décadaire significative du coefficient « $m$ », on a étudié la distribution statistique du rapport : $\frac{\varphi(R_n)}{R_g} = m$, pour une quinzaine de stations météorologiques réparties sur le territoire métropolitain. Lors d'un traitement climatologique antérieur (BROCHET et GERBIER, 1968) concernant des calculs d'ETP par différentes méthodes, on avait déjà été amené, par application numérique de l'expression (3), à différencier les deux parties de la formule de PENMAN, ce qui a permis de disposer, par décade, des valeurs individuelles de $\varphi(R_n)$ pour la décennie 1958-1967. Ayant d'autre part calculé les données décadaires de $R_g$ à partir de la durée d'insolation, il fut facile de déterminer pour chacune des 18 décades du semestre estival (avril à septembre) la valeur de $m$. Au cours du semestre hivernal, il ne serait pas justifié d'adopter comme en été, un albedo moyen de 0,20, correspondant à un couvert végétal dense et quasi continu. Les valeurs de l'ETP ne présentant pas un grand intérêt au cours de cette période n'ont pas été étudiées.

Les 14 stations ayant fait l'objet de cet examen sont : Lille, Saint-Quentin, Rouen, Rennes, Tours, Romilly, Strasbourg, Limoges, Gourdon, Lyon, Montélimar, Montpellier, Marignane et Perpignan.

Pour chaque décade, au cours de la décennie envisagée, on a calculé la moyenne $\overline{m}$ de $m$, l'écart type $s$ et le coefficient de variation $\frac{s}{\overline{m}}$.

A titre d'exemple, une sélection de ces données figure dans le tableau 3.

On constate en particulier que la variabilité interannuelle de $m$, pour une décade déterminée est relativement faible puisqu'en quasi-totalité (95 p. 100 des cas), les coefficients de variation sont inférieurs à 0,10 et même voisins de 0,05 de mai à août.

Pour chaque site, la variation saisonnière est nettement mise en évidence, les moyennes décadaires de « $m$ » passant de valeurs voisines de 0,0040 en début avril et fin septembre, à des valeurs dépassant 0,0060 en juillet et août, l'ETP étant exprimée en millimètres et le rayonnement global $R_g$ en cal · $cm^{-2}$ $mn^{-1}$. La dispersion spatiale des moyennes de ce facteur au sein de chaque décade se révèle elle-même assez limitée, ce qui justifie le calcul de moyennes générales décadaires pour les 14 stations groupées, à partir desquelles a été tracée la courbe d'ajustement de la figure 1. Si, d'autre part, on établit pour chaque décade les coefficients de corrélation par station entre les moyennes locales de $m$ et les latitudes, on trouve des valeurs qui oscillent entre 0,74 et 0,96 suivant les mois. Aussi, a-t-on été amené à tracer pour chaque mois les droites de régression entre les valeurs de $m$ et les latitudes. On constate que d'avril à juillet, ces droites sont pratiquement confondues, mais que pour août et septembre, leur pente augmente sensiblement, c'est-à-dire que l'effet de latitude est plus marqué, traduisant probablement une accentuation plus rapide de l'aridité dans les régions méridionales au cours du semestre estival.

TABLEAU 3

*Valeurs moyennes quotidiennes par décade du coefficient m entre avril et septembre* (1958-1967)

| Mois | Décade | Lille | | | Strasbourg | | | Rennes | | | Gourdon | | | Montélimar | | | Montpellier | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\overline{m}$ | $s$ | $s/\overline{m}$ | $\overline{m}$ | $s$ | $s/\overline{m}$ | $\overline{m}$ | $s$ | $s/\overline{m}$ | $\overline{m}$ | $s$ | $s/\overline{m}$ | $\overline{m}$ | $s$ | $s/\overline{m}$ | $\overline{m}$ | $s$ | $s/\overline{m}$ |
| Avril | 1 | 0042 | 0005 | 0.12 | 0040 | 0004 | 0.10 | 0042 | 0004 | 0.09 | 0042 | 0003 | 0.08 | 0041 | 0003 | 0.07 | 0042 | 0003 | 0.08 |
| | 2 | 43 | 4 | .10 | 44 | 4 | .08 | 44 | 3 | .06 | 46 | 3 | .06 | 44 | 3 | .06 | 46 | 3 | .07 |
| | 3 | 45 | 3 | .07 | 47 | 4 | .08 | 46 | 3 | .05 | 47 | 3 | .06 | 46 | 4 | .07 | 47 | 4 | .08 |
| Mai | 1 | 49 | 3 | .05 | 51 | 3 | .07 | 51 | 4 | .07 | 51 | 4 | .07 | 50 | 2 | .04 | 52 | 3 | .05 |
| | 2 | 53 | 4 | .07 | 56 | 4 | .07 | 54 | 3 | .05 | 56 | 3 | .06 | 55 | 4 | .06 | 56 | 3 | .06 |
| | 3 | 54 | 4 | .07 | 55 | 2 | .04 | 54 | 3 | .06 | 55 | 2 | .04 | 56 | 2 | .04 | 57 | 2 | .04 |
| Juin | 1 | 57 | 4 | .06 | 60 | 5 | .08 | 57 | 4 | .06 | 59 | 4 | .06 | 59 | 4 | .06 | 60 | 4 | .07 |
| | 2 | 59 | 3 | .05 | 62 | 3 | .05 | 60 | 3 | .04 | 61 | 3 | .04 | 61 | 3 | .04 | 61 | 3 | .05 |
| | 3 | 60 | 3 | .05 | 63 | 4 | .06 | 60 | 2 | .04 | 63 | 3 | .05 | 64 | 3 | .05 | 64 | 3 | .05 |
| Juillet | 1 | 60 | 3 | .05 | 61 | 4 | .06 | 60 | 3 | .05 | 62 | 2 | .04 | 63 | 2 | .04 | 63 | 3 | .05 |
| | 2 | 61 | 2 | .05 | 64 | 2 | .03 | 62 | 3 | .05 | 64 | 2 | .03 | 64 | 1 | .02 | 64 | 2 | .03 |
| | 3 | 60 | 2 | .03 | 62 | 2 | .04 | 60 | 2 | .03 | 63 | 3 | .04 | 64 | 4 | .05 | 65 | 4 | .05 |
| Août | 1 | 59 | 3 | .05 | 61 | 2 | .03 | 59 | 2 | .04 | 61 | 2 | .02 | 62 | 2 | .03 | 63 | 3 | .05 |
| | 2 | 56 | 2 | .04 | 59 | 3 | .05 | 57 | 3 | .05 | 58 | 2 | .04 | 58 | 2 | .04 | 60 | 2 | .04 |
| | 3 | 53 | 3 | .06 | 54 | 3 | .06 | 54 | 3 | .05 | 55 | 2 | .04 | 55 | 3 | .05 | 57 | 3 | .05 |
| Septembre | 1 | 49 | 4 | .09 | 49 | 4 | .08 | 50 | 3 | .07 | 53 | 3 | .06 | 53 | 3 | .05 | 54 | 3 | .06 |
| | 2 | 43 | 4 | .10 | 45 | 3 | .08 | 46 | 4 | .10 | 50 | 5 | .10 | 49 | 5 | .09 | 52 | 6 | .12 |
| | 3 | 36 | 6 | .16 | 38 | 5 | .12 | 38 | 3 | .08 | 41 | 5 | .11 | 42 | 4 | .09 | 47 | 5 | .11 |

Ces droites de régressions mensuelles ont été reportées sur un abaque (fig. 2) où les valeurs de $m$, ont été remplacées en ordonnée par les rapports du coefficient $m$ par latitudes à la moyenne générale décadaire fournie par le graphique de la figure 1 $\left(\frac{m\lambda}{\overline{m}}\right)$.

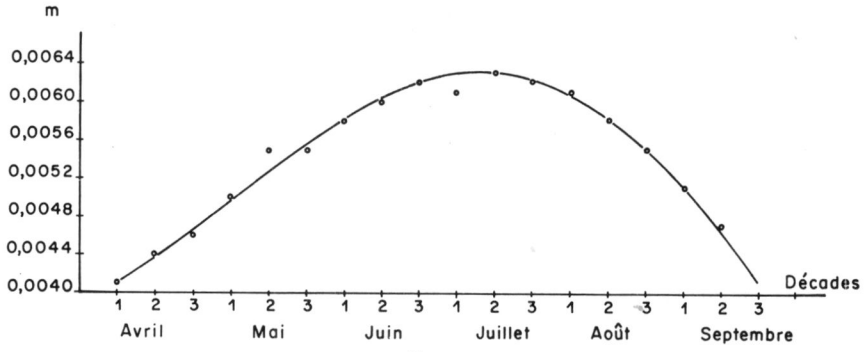



FIG. 1

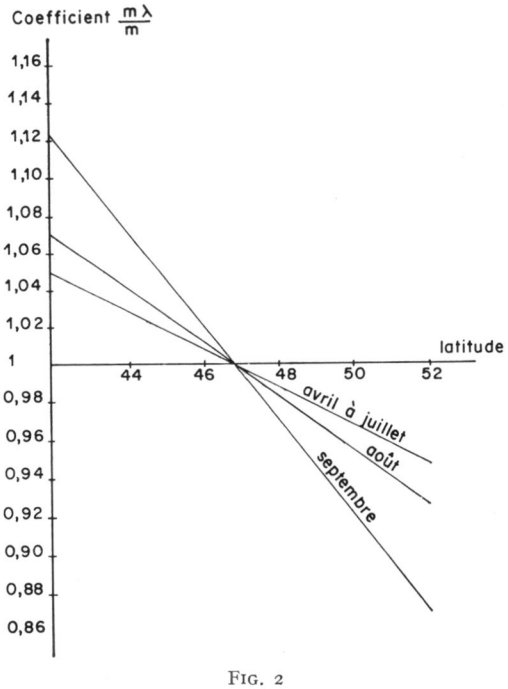



FIG. 2

On obtient ainsi la valeur du coefficient $m$ dans un site quelconque en utilisant d'abord le graphique 1, afin d'obtenir une valeur décadaire globale, puis le graphique 2, pour ajuster ce coefficient à la latitude du lieu, en multipliant la valeur globale obtenue précédemment par le coefficient lu en ordonnée.

*Examen du terme* $\varphi(E_a)$

Dans l'expression de PENMAN :

$$\varphi(E_a) = E_a \frac{1}{1 + \lambda(T)},$$

BOUCHET (1964) a montré que $E_a$ pouvait s'exprimer en fonction de l'évaporation « Piche » :

$$E_a = K_3 E_p [1 + \lambda(\theta)]$$

avec

$$\theta = \frac{T + T_d}{2} \qquad \text{et} \qquad \lambda(\theta) = \frac{e'_\theta}{\gamma}$$

On a donc :

$$\varphi(E_a) = K_3 \cdot E_p \cdot \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \lambda(T)}$$

soit :

$$\varphi(E_a) = n \cdot E_p$$

avec

$$n = K_3 \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \lambda(T)}$$

Dans cette expression, $\lambda(x)$ est une fonction croissante de $x$; $\theta$ et T varient en général dans le même sens au cours des saisons et avec la latitude, tandis que $K_3$ est un coefficient purement instrumental. On peut donc présumer, là encore, que $n$ se présente comme une fonction de la saison et de la latitude. Ainsi, comme pour le coefficient $m$, ci-dessus, on a calculé pour chaque décade le rapport :

$\frac{\varphi(E_a)}{E_p} = n$, en utilisant d'une part les mesures décadaires de l'évaporation Piche sous abri ($E_p$) et d'autre part, les résultats du programme numérique appliqué au 2e terme de l'expression développée de PENMAN (3), soit :

$$n = \frac{\frac{1}{1 + \lambda(T)} \cdot 0{,}26\ (e_w - e)\ (1 + 0{,}4\ V)}{E_p}$$

Parmi les 14 stations préalablement choisies, trois ont dû être éliminées en raison du manque d'homogénéité de la série des mesures de Piche, à savoir : Rouen, Limoges et Perpignan.

L'examen des moyennes décadaires et mensuelles fait apparaître une incidence sensible de la latitude tandis que la variabilité intermensuelle de ce facteur se révèle assez restreinte (inférieure à 20 p. 100) au cours du semestre estival (tabl. 4).

On notera que la dispersion de $n$ par rapport à la moyenne mensuelle ($s/\bar{n}$) est plus importante que pour $m$, c'est-à-dire que les estimations de ce coefficient seront moins précises ; mais le terme advectif ne représente en général qu'environ 40 p. 100 du total de l'ETP et l'erreur que l'on peut ainsi introduire se trouve limitée.

Compte tenu des remarques précédentes, on a cherché à ajuster graphiquement les moyennes mensuelles de $n$ aux latitudes, en prenant comme référence les coeffi-

TABLEAU 4

*Valeurs moyennes mensuelles du coefficient n entre avril et septembre* (1958-1967)
(abri en bois grand modèle)

| Mois | Lille | | | Strasbourg | | | Rennes | | | Gourdon | | | Montélimar | | | Montpellier | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\overline{n}$ | $s$ | $s/\overline{n}$ | $\overline{n}$ | $s$ | $s/\overline{n}$ | $\overline{n}$ | $s$ | $s/\overline{n}$ | $n$ | $s$ | $s/\overline{n}$ | $\overline{n}$ | $s$ | $s/\overline{n}$ | $\overline{n}$ | $s$ | $s/\overline{n}$ |
| Avril | 0.49 | 0.08 | 0.16 | 0.37 | 0.10 | 0.27 | 0.42 | 0.04 | 0.09 | 0.34 | 0.06 | 0.18 | 0.39 | 0.05 | 0.13 | 0.34 | 0.06 | 0.18 |
| Mai | 0.40 | 0.03 | 0.08 | 0.35 | 0.09 | 0.26 | 0.38 | 0.06 | 0.16 | 0.31 | 0.04 | 0.13 | 0.35 | 0.05 | 0.14 | 0.33 | 0.05 | 0.15 |
| Juin | 0.38 | 0.04 | 0.08 | 0.37 | 0.11 | 0.29 | 0.36 | 0.04 | 0.11 | 0.30 | 0.04 | 0.13 | 0.34 | 0.04 | 0.12 | 0.30 | 0.05 | 0.17 |
| Juillet | 0.39 | 0.05 | 0.13 | 0.35 | 0.08 | 0.23 | 0.36 | 0.06 | 0.17 | 0.29 | 0.05 | 0.17 | 0.31 | 0.05 | 0.16 | 0.29 | 0.05 | 0.17 |
| Août | 0.40 | 0.05 | 0.12 | 0.39 | 0.12 | 0.31 | 0.37 | 0.05 | 0.14 | 0.31 | 0.05 | 0.16 | 0.33 | 0.04 | 0.12 | 0.29 | 0.04 | 0.14 |
| Septembre | 0.41 | 0.06 | 0.15 | 0.34 | 0.08 | 0.23 | 0.37 | 0.07 | 0.19 | 0.35 | 0.06 | 0.17 | 0.36 | 0.05 | 0.14 | 0.33 | 0.07 | 0.21 |

cients minimaux correspondant au mois de juin et juillet (fig. 3). D'autre part, en calculant pour les stations prises en compte le rapport de la moyenne de chaque mois à celle de juin-juillet, on trouve des valeurs assez voisines :

| | |
|---|---|
| Avril | 1,2 |
| Mai | 1,1 |
| Juin | 1 |
| Juillet | 1 |
| Août | 1,05 |
| Septembre | 1,1 |

Pour estimer les valeurs mensuelles de $n$ dans un site quelconque, il suffit donc à l'aide du graphique 3 de rechercher la moyenne de référence juin-juillet en fonction de la latitude puis, suivant le mois, de multiplier cette valeur par l'un des coefficients ci-dessus.

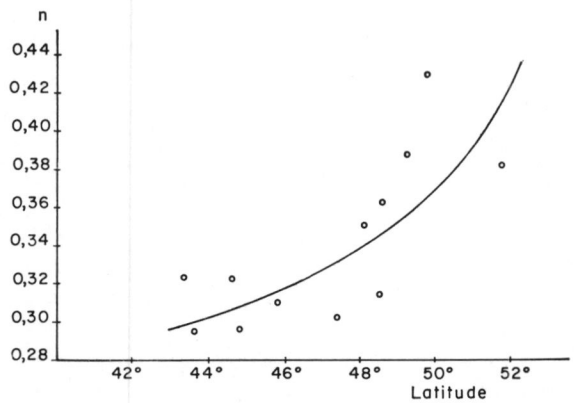



FIG. 3

Finalement et compte tenu des ajustements statistiques définis précédemment et appliqués à la formule théorique de PENMAN, on aboutit à une expression simplifiée exprimant l'évapotranspiration potentielle à partir de deux facteurs climatiques : le rayonnement global, déduit de la durée d'insolation et l'évaporation Piche sous abri :

$$\underline{\mathrm{ETP} = m\mathrm{R_g} + n\mathrm{E_p}}$$

ou encore

$$\mathrm{ETP} = m\mathrm{I_{GA}}\left(0{,}18 + 0{,}62\,\frac{h}{\mathrm{H}}\right) + n\mathrm{E_p} \qquad (6)$$

Dans cette expression, $\mathrm{I_{GA}}$, $m$ et $n$ sont des constantes pour un site donné et pour chaque décade. Moyennant quelques précautions, la mesure de $\mathrm{E_p}$ est assez facile à réaliser et rend compte du caractère spécifique du climat local.

Par contre, la durée d'insolation, mesurée sur un intervalle de quelques jours, a une signification régionale bien établie.

Toute exploitation agricole peut être rattachée, sous réserve bien entendu d'un examen topoclimatologique préalable, à l'un des quelques cents héliographes répartis sur le territoire métropolitain.

La procédure pratique pour utiliser la formule (6) est par conséquent d'effectuer des mesures locales d'évaporation Piche et de recevoir de la station météorologique la plus représentative les durées d'insolation correspondant à la même période.

RÉSEAU INSTRUMENTAL

Héliographes

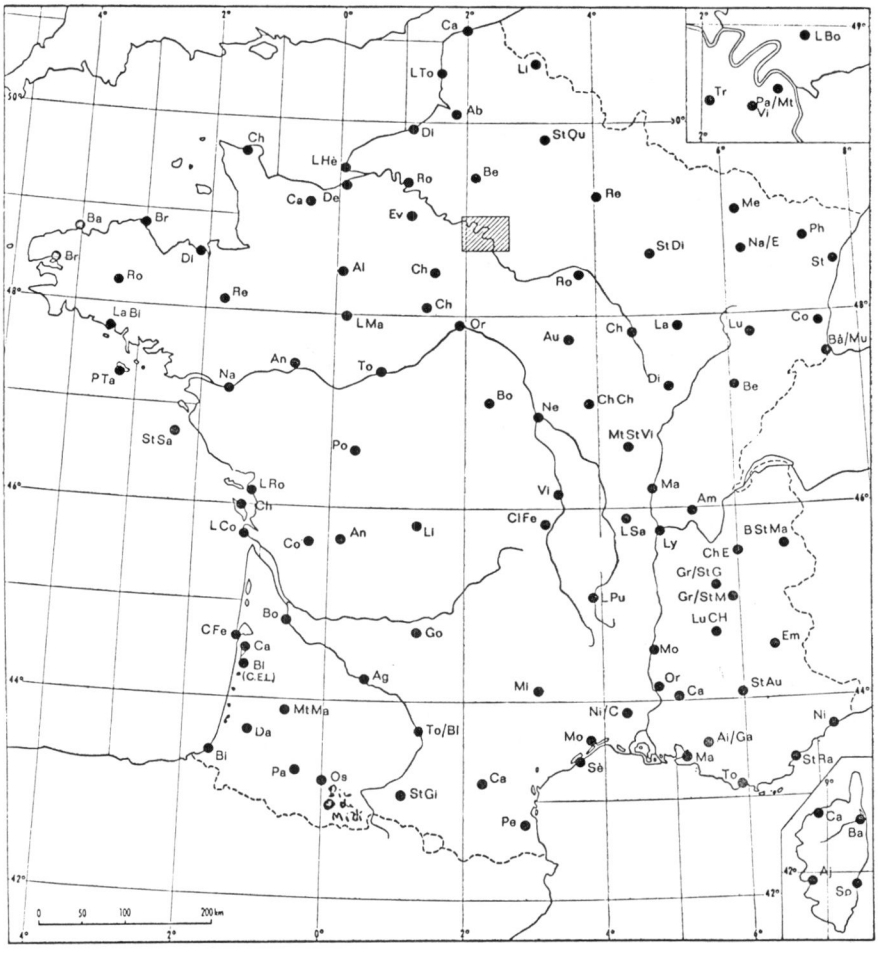



FIG. 4

Il importe de bien noter que ces ajustements ont été effectués à partir de mesures d'évaporation relevées sous abri en bois grand modèle. En ce qui concerne l'abri plastique, largement diffusé dans les stations d'observation de la Météorologie

nationale et l'abri « agrométéorologique », il convient d'appliquer les corrections ci-dessous, qui résultent d'une série de mesures comparatives entre ces trois types d'installations :

$$n \text{ (plastique)} = n \text{ (bois GM)} \times 1{,}30$$
$$n \text{ (agrométéo)} = n \text{ (bois GM)} \times 1{,}35$$

A titre de comparaison et en utilisant les normales mensuelles des paramètres climatiques intervenant dans les formules développées de $m$ et $n$ (5) et (6), on a calculé les valeurs mensuelles de ces coefficients pour quelques stations météorologiques correspondant à des sites géographiques bien différenciés. On constate un accord satisfaisant entre ces valeurs et celles déduites des abaques proposés.

## III. — CONTRÔLE DE LA FORMULE $\mathrm{ETP} = m\mathrm{R_g} + n\,\mathrm{E_p}$

Afin de vérifier la validité des résultats obtenus par cette méthode, il a été procédé à une comparaison entre les valeurs calculées par décades et des mesures effectuées dans des centres de Bioclimatologie de l'I. N. R. A., à l'aide d'évapotranspiromètres pesables. Les mesures disponibles concernent la Minière en 1969 (dans la région parisienne, Yvelines) et Montfavet en 1968 et 1969 près d'Avignon dans le Vaucluse. Il s'agit de deux sites géographiques et climatiques bien différents, éloignés en outre des stations météorologiques dont les observations ont servi de base aux déterminations statistiques des coefficients $m$ et $n$.

Le tableau 5 représente, exprimés en pourcentages, les écarts mensuels relatifs des ETP, calculés par différentes méthodes, par rapport aux mesures $\left(\frac{\mathrm{C—M}}{\mathrm{M}}\right)$.

On constate que les écarts entre les mesures et les valeurs d'ETP obtenues à partir de la méthode proposée, sont très comparables à ceux qui résultent de l'application de la formule de PENMAN et sont généralement plus faibles que ceux provenant des formules de TURC et du Piche corrigé.

Les coefficients de corrélation entre calculs et mesures décadaires sont les suivants (54 couples de valeurs pour chaque estimation) :

| $m\mathrm{R_g} + n\mathrm{E_p}$ | PENMAN | TURC | PICHE corrigé |
|---|---|---|---|
| 0,93 | 0,94 | 0,93 | 0,79 |

On doit noter que la formule du Piche corrigé a été utilisée dans son expression la plus simple, sans tenir compte de l'aridité (coefficient $\alpha_0$ constant). Il en résulte surtout en zone méridionale une distorsion plus ou moins importante selon les années.

Enfin, dans le tableau 6, on a figuré, en pourcentages, les fréquences d'occurrence cumulées des valeurs absolues des écarts relatifs décadaires inférieurs ou égaux à divers seuils.

TABLEAU 5

*Comparaison entre mesures mensuelles d'ETP et calculs par différentes méthodes*

Les écarts sont exprimés en p. 100 des mesures $\left(\frac{C - M}{M}\right)$

*La Minière, I. N. R. A., 1969*

| Mois | Mesure mm | $mR_g + nE_p$ | | Penman | | Turc | | Bouchet ($\bar{\alpha}$ mensuel) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % |
| Avril ..... | 70 | 96 | + 37 * | 72 | + 3 | 62 | — 11 | 105 | + 50 * |
| Mai ..... | 96 | 106 | + 10 | 109 | + 14 | 94 | — 2 | 86 | — 10 |
| Juin ..... | 117 | 117 | 0 | 113 | — 3 | 98 | — 16 | 108 | — 7 |
| Juillet..... | 129 | 114 | — 12 | 117 | — 9 | 103 | — 20 | 105 | — 19 |
| Août ..... | 102 | 92 | — 10 | 94 | — 8 | 89 | — 13 | 93 | — 9 |
| Septembre .. | 62 | 62 | 0 | 55 | — 11 | 64 | + 3 | 63 | + 2 |
| Semestre | 576 | 587 | + 2 | 560 | — 3 | 510 | — 11 | 560 | — 3 |

* Ces écarts importants sont imputables à un relevé anormalement élevé de l'évaporation Piche au cours de la 1re décade d'avril.

*Montfavet, I. N. R. A., 1968*

| Mois | Mesure mm | $mR_g + nE_p$ | | Penman | | Turc | | Bouchet ($\bar{\alpha}$ mensuel) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % |
| Avril ..... | 96 | 102 | + 6 | 110 | + 15 | 96 | 0 | 93 | — 3 |
| Mai ..... | 147 | 129 | — 12 | 141 | — 4 | 113 | — 23 | 123 | — 16 |
| Juin ..... | 169 | 160 | — 6 | 165 | — 2 | 150 | — 11 | 143 | — 26 |
| Juillet..... | 198 | 178 | — 10 | 208 | + 5 | 171 | — 14 | 153 | — 23 |
| Août ..... | 147 | 126 | — 14 | 164 | + 12 | 132 | — 10 | 94 | — 36 |
| Septembre .. | 95 | 81 | — 15 | 107 | + 13 | 100 | + 5 | 62 | — 35 |
| Semestre | 852 | 776 | — 9 | 895 | + 5 | 762 | — 11 | 668 | — 21 |

*Montfavet, I. N. R. A., 1969*

| Mois | Mesure mm | $mR_g + nE_p$ | | Penman | | Turc | | Bouchet ($\bar{\alpha}$ mensuel) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % | valeur mm | écart % |
| Avril ..... | 105 | 117 | + 11 | 93 | — 12 | 87 | — 17 | 129 | + 22 |
| Mai ..... | 146 | 148 | + 1 | 132 | — 10 | 126 | — 14 | 154 | + 5 |
| Juin ..... | 155 | 166 | + 7 | 151 | — 3 | 135 | — 13 | 164 | + 6 |
| Juillet..... | 179 | 187 | + 4 | 177 | — 1 | 158 | — 12 | 194 | + 8 |
| Août ..... | 160 | 158 | — 1 | 140 | — 12 | 133 | — 17 | 160 | 0 |
| Septembre .. | 86 | 81 | — 6 | 74 | — 14 | 91 | + 6 | 65 | — 24 |
| Semestre | 831 | 857 | + 3 | 767 | — 8 | 730 | — 12 | 866 | + 4 |

TABLEAU 6

*Fréquence p. 100 des valeurs absolues des écarts relatifs décadaires*

| Écarts relatifs décadaires | ⩽ 5 % | ⩽ 10 % | ⩽ 15 % | ⩽ 20 % | ⩽ 25 % | ⩽ 30 % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PENMAN (%) ..... | 30 | 65 | 76 | 93 | 96 | 98 |
| $mR_g + nE_p$ (%)..... | 37 | 65 | 78 | 91 | 94 | 96 |
| TURC (%) ..... | 22 | 46 | 63 | 85 | 93 | 98 |
| Piche corrigé (%)..... | 19 | 35 | 44 | 56 | 69 | 74 |

## CONCLUSION

Le but recherché était d'élaborer une méthode de calcul de l'ETP facilement maniable et ne mettant en jeu qu'un nombre restreint de facteurs atmosphériques.

Dans l'expression proposée, la date et la latitude fixent les valeurs des coefficients $m$ et $n$, que l'on peut alors résumer dans un tableau. La durée d'insolation a une signification régionale et, en vue d'une utilisation opérationnelle de la formule $ETP = mR_g + nE_p$, pourrait être fournie par la station météorologique ou le poste agrométéorologique le plus représentatif de la zone climatique considérée. Quant au deuxième terme de l'expression, il dépend de facteurs atmosphériques à caractère essentiellement local, tels que le vent, l'humidité de l'air, la température, mais il est directement déterminable sur place par la mesure de l'évaporation Piche qui, si elle exige certaines précautions, s'accommode d'une installation simple et peu onéreuse.

Les contrôles réalisés dans deux régions très contrastées du point de vue climatique montrent que les résultats sont comparables à ceux obtenus par la méthode de PENMAN dont est déduite l'expression proposée ici. Ainsi, les ajustements statistiques qui ont été introduits ne paraissent pas altérer les résultats du calcul, au moins dans le domaine géographique pour lequel ces ajustements ont été effectués.

*Reçu pour publication en octobre 1971.*

## REMERCIEMENTS

Un nombre important de données climatiques individuelles a été utilisé pour établir cette formule d'ajustement statistique. Une grande partie des calculs a été effectuée par M. ALOUIS (division de Climatologie, section d'Agroclimatologie). Qu'il trouve ici l'expression de nos remerciements pour son active coopération.

## SUMMARY

### A PRACTICAL METHOD OF CALCULATION OF THE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION

The calculation of potential evapotranspiration from the expression of the energy balance drawn up by PENMAN, leads to a formula ETP = $m$Rg + $n$Ep, in which the only weather parameters involved are the global radiation and the evaporation measured under shelter by mean of the Pich evaporometer.

It is shown that the coefficients $m$ and $n$ are essentially dependent of latitude and season.

With a view to an operational use of the above mentionned formula, the value of the global radiation or, failing this, the duration of insolation, may be supplied by the weather report station most representative of the climatic zone concerned, while the Piche measurement characterizing the microclimate, is within the scope of any user, subject to certain precautions (type of shelter, location of the Piche evaporometer).

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINE PRAKTISCHE BERECHNUNGSMETHODE DER POTENTIELLEN VERDAMPFUNGSAUSSCHWITZUNG

Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration, ausgehend von dem durch PENMAN au gestellten Ausdruck der energetischen Bilanz führt zu einer Formel der nachstehender Form: ETP = $m$Rg + $n$EP, die als atmosphärische Parameter nur die Global strahlung und die in gehäuse an geschütztem Ort mit dem Verdunstungsmesser vo Piche gemessene Verdunstung enthält.

Es wird gezeigt, dass die Beiwerte $m$ und $n$ wessentlich von der geographischen Breite und der Jahreszeit abhängen.

Im Hinblick auf die praktische Anwendung dieser Formel, kann der Wert der Globalstrahlung, oder, als Ersatz, die Dauer der Sonneneinstrahlung von der für die betreffende Klimazone zuständigen meteorologischen Station geliefert werden, während die das Mikroklima kennzeichnende Messung am Piche-Gerät von jedem Benutzer, unter Einhaltung gewisser Vorsichtsmassnahmen (Art des Gehaüsse-Aufstellungsort des Atmometers von Pich) durchgeführt werden.

## РЕЗЮМЕ

### Практический метод рассчета потенциальной эвапотранспирации

П. БРОШЕ, Н. ЖЕРБЬЕ.

При рассчете потенциальной эвапотранспирации, исходя от выражения энергетического баланса, найденного Пенманом получают формулу ETP = m Rg + n. Ep в которую, качестве атмосферических параметров входят только общее излучение и испарение, измеренное под прикрытием с помощью аппарата Пиша. Доказывается что коэффициенты m и n зависят главным образом от широты и от времени года.

Чтобы придать этой формуле оперативный характер, самая типичная из метеорологических станций рассматриваемой климатической зоны, может доставить величину общего излучения и длительность инсоляции в этой зоне, в то время как измерения «Пиша» характеризующие микроклимат могут быть проведены каждым утилизатором, при принятии некоторых мер предостожности (тип прикрытия, местонахождение аппарата Пиша).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PENMAN H. L., 1948. Potential evaporation from openwater, baresoil and grass. *Proc. Roy. Society*, T. 193, Londres.

BOUCHET R.-J., 1964. Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et productivité végétale. *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A., Paris, 151-232.

BROCHET P., GERBIER N., 1968. L'évapotranspiration, aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. *Monographie de la Météorologie nationale*, nº 65, Paris.

SCHOCH P., DANCETTE, G. 1967. Utilisation de l'évaporomètre Piche pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Communication au *II Congrès international d'Agrométéorologie*, Leipzig.

BROCHET P., GERBIER N., 1970. Recueil de données agrométéorologiques : quelques éléments du bilan énergétique et du bilan hydrique. *Monographie de la Météorologie nationale*, nº 75, Paris.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (1), 51-76.

# ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DE CASES LYSIMÉTRIQUES (1)

H. SEDGHI

*Laboratoire des Sols,*
*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

Cette étude concerne l'écoulement de l'eau gravitaire non saturante dans le sol ; elle porte sur des cases lysimétriques dont le sol est nu, les profondeurs mises en jeu étant de 50 cm, 100 cm, 150 cm ; des « bacs » analogues à ces lysimètres, bien que de plus faible surface, ont été également utilisés, ils étaient à l'abri des précipitations atmosphériques et alimentés en eau artificiellement.

La forme des hydrogrammes de drainage montre que sous le climat parisien on n'observe qu'exceptionnellement une saturation du limon utilisé ; les débits de pointe observés sont de l'ordre de 3 à 4 mm/heure. La vitesse de transfert, plus élevée dans les cases profondes que dans les peu profondes, varie beaucoup avec l'humidité initiale si bien que les différences de comportement entre cases de 150 cm de profondeur et cases de 50 dépendent de la proximité de l'épisode pluvieux précédent. Il faut noter que les vitesses de transfert qui ont été déterminées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées par FÉODOROFF au champ à l'aide de tensiomètres placés à diverses profondeurs ; il semble donc que les résultats observés dans les cases soient transposables au champ.

De 85 à 95 p. 100 de l'eau se trouve drainé très rapidement, le reste est évacué lentement, et ceci d'autant plus que la couche de terre traversée est plus profonde ; ainsi, 2 à 4 jours après une pluie suffisante pour entraîner un drainage total supérieur à 5 mm, le drainage quotidien est redevenu inférieur à 1/2 mm ; encore 2 à 4 jours plus tard, il devient négligeable pour les cases de 50 cm (inférieur à 0,15 mm en 1 jour, et bientôt nul ou à peu près) ; cette phase dure par contre une dizaine de jours pour les cases de 100 cm et plus pour celles de 150 cm (pour situer l'importance des drainages inférieurs à 1/2 mm en 1 jour, indiquons que pour les cases de 50 cm, ils assurent environ le $\frac{1}{10}$ du drainage total annuel). Enfin, pour les bacs, les oscillations de température peuvent provoquer des oscillations diurnes de débit en fin de ressuyage, probablement en modifiant la tension superficielle de l'eau.

## INTRODUCTION

D'assez nombreuses études ont été effectuées pour établir l'allure de la surface d'une nappe d'eau s'écoulant dans un sol, vers des tuyaux de drainage ou un puits. Dans ces conditions, on peut considérer que le sol est pratiquement saturé au-dessous

(1) Texte rédigé par S. HÉNIN et L. TURC à partir de la thèse de Docteur Ingénieur de H. SEDGHI (Paris, 1971).

TABLEAU I

*Drainage annuel de cases lysimétriques*

| | | 1 m² de surface | 2 m² de surface | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P (mm) | Année | C 2 h. A 60 cm | C 4 50 cm | C 5 100 cm | C 8 150 cm | C 12 150 cm | C 17 150 cm | C 24 150 cm | C 25 150 cm | C 26 150 cm |
| 470,3 | 1959 | 221,5 | 325 | 330,2 | 327 | 338 | 334,8 | (298,2) | (267,7) | (230,5) |
| 690,9 | 1960 | 390 | 364,8 | 387,2 | 380,5 | 377,5 | 362 | 389,4 | 383,2 | 386,2 |
| 557,3 | 1961 | 242,3 | 263,4 | 260 | 264,3 | 285,4 | 268,9 | 290,3 | 287,4 | 290,5 |
| 512,1 | 1962 | 237,7 | 236,7 | 233,5 | 247 | 250,3 | 248,6 | 250 | 260,1 | 262,5 |
| 576,5 | 1963 | 231,7 | 209,1 | 222,8 | 236,6 | 243,5 | 224,7 | 225,7 | 243,7 | 246,0 |
| 493,7 | 1964 | 145,3 | 120,8 | 159 | 145,2 | 212,5 | 159,0 | 181,5 | 197,3 | 184,9 |
| 837,4 | 1965 | 422,2 | 456 | 483,4 | 491 | 489,4 | 475,7 | 448,2 | 471,27 | 446,6 |
| 814,4 | 1966 | 446,2 | 460,3 | 477,8 | 502,9 | 479,2 | 494,2 | 432,2 | 469,5 | 455,7 |
| 619,0 | moyenne | 292,1 | 304,5 | 319,2 | 324,3 | 334,4 | 320,9 | | | |

du niveau de la nappe et appliquer la loi de Darcy. En ce qui concerne l'eau non saturante, diverses tentatives ont été réalisées pour exprimer l'écoulement du fluide en fonction de certaines contraintes, pour des humidités inférieures à la capacité au champ ; on utilise alors des équations caractérisant les phénomènes de diffusion. Par contre, on connaît fort mal les mouvements de l'eau s'effectuant dans un sol quand l'humidité est intermédiaire entre la capacité au champ et la saturation. C'est pour préciser l'allure de ce phénomène que nous avons entrepris l'étude de l'écoulement des cases lysimétriques.

## PREMIÈRE PARTIE

## ÉTUDE EN CASES LYSIMÉTRIQUES

Le dispositif que nous avons étudié ayant déjà été décrit (MOHSENEIAN, 1966), nous nous contenterons de rappeler qu'il s'agit d'une batterie de cases en béton remplies d'un sol de limon reposant sur une couche drainante constituée d'un lit de sable et d'un lit de gravier. La surface est de 2 m² et les profondeurs utiles de 0,50 m, 1 m et 1,50 m. Quelques comparaisons ont également été effectuées avec deux cases ayant 1 m² de surface et 60 cm de profondeur utile et remplies l'une d'une arène granitique et l'autre par l'horizon A d'un sol de limon.

Le dispositif est suivi régulièrement et l'on mesure chaque jour la quantité d'eau drainée, ainsi que les précipitations déterminées à l'aide d'un pluviomètre installé dans le voisinage. Dans la suite de cette étude, pour avoir une vue plus fine du phénomène, on a disposé des pluviographes au-dessous des trois premières cases de manière à enregistrer le débit réel instantané.

On peut regretter que ce dispositif ne comprenne pas de répétitions. Pour évaluer la fidélité des mesures, une comparaison générale a été effectuée entre les drainages mesurés sur les trois cases qui font l'objet de cette étude et certaines cases voisines. Les drainages annuels sont reproduits sur le tableau 1.

On constate qu'il existe de légères différences entre les cases et que le drainage de celles qui ont la plus faible profondeur paraît légèrement inférieur à celui des cases de plus grande profondeur. L'absence de répétitions ne permet pas de décider si ces différences sont significatives ou non ; toutefois, elles sont suffisamment faibles pour ne pas mettre en cause des observations de détail qui seront présentées par la suite, celles-ci faisant apparaître des différences beaucoup plus importantes que celles que l'on peut enregistrer au niveau des effets annuels moyens.

### *Quelques comparaisons entre précipitations et drainages cumulés*

Les courbes de précipitations et drainages cumulés ont été établies au cours de différentes périodes de l'année, afin de mettre en évidence l'allure des phénomènes et en particulier l'aspect global de la réponse du drainage aux précipitations. Les figures 1 et 2 correspondent à des périodes d'hiver. Au mois de février, les deux fortes précipitations du 7 et du 13 se traduisent, sur les courbes de drainage, par deux remontées, mais à pente beaucoup plus douce que les précipitations. Comme on pouvait s'y attendre, le passage à travers le sol se manifeste par un retard à l'écoulement,

celui-ci étant étalé dans le temps. On notera sur la figure 1 que la somme des drainages cumulés tant pour la case à 50 cm que pour la case à 1,50 m est supérieure au total des précipitations. Ce fait s'explique si l'on considère le temps nécessaire pour que le sol se ressuie après une pluie. On peut dire que le 7 février, au moment où se sont produites les précipitations figurant à l'origine du graphique, les cases renfermaient encore de l'eau provenant de précipitations antérieures et qui ne s'était pas encore écoulée. Un autre phénomène signalé par BASTISSE et HÉNIN (1955) peut également intervenir, c'est l'accumulation de neige sur les cases, leurs rebords créant des angles morts qui permettent l'accumulation des flocons.

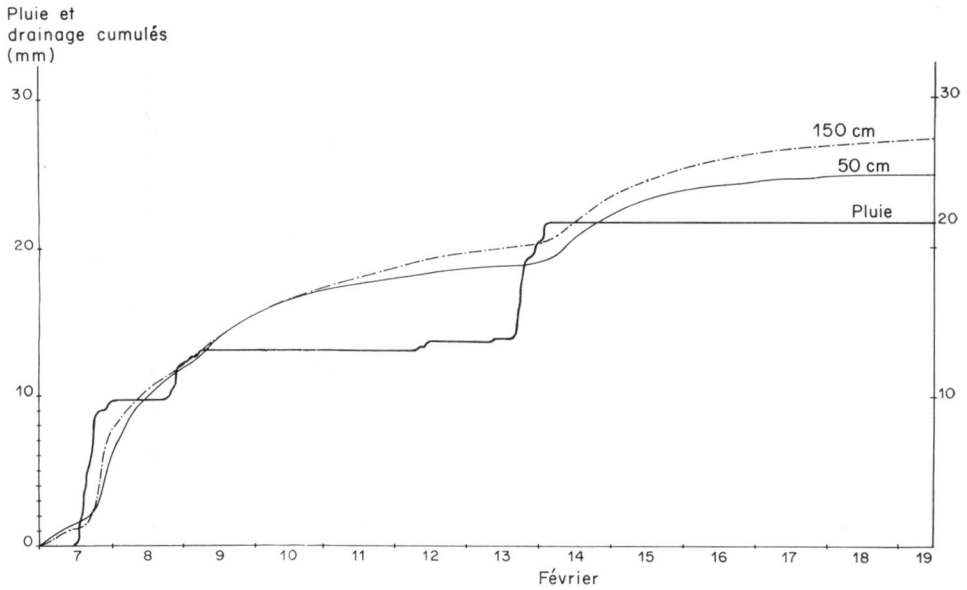



FIG. 1. — *Courbes de précipitations et de drainage cumulés du 7 au 20 février 1968* (saison froide)

La figure 2 concerne également une période relativement froide, bien que cette fois les courbes de drainage cumulé se maintiennent au-dessous de la courbe des précipitations cumulées ; il est possible qu'une certaine évaporation ait déjà commencé à se manifester. Une différence caractérise également ces deux diagrammes: dans le premier, le drainage des cases à 50 cm est généralement inférieur à celui des cases à 1,50 m, sur la figure 2 au contraire, la partie initiale correspondant au débit relativement intense montre que la case de 50 cm a drainé plus vite que les cases plus profondes, mais celles-ci continuent à drainer plus longtemps, si bien que ces deux cases ont finalement un débit cumulé légèrement supérieur à celui de la case de 50 cm.

La figure 3 correspond à une période un peu plus chaude ; elle présente sensiblement les mêmes caractéristiques que les courbes précédentes. La case de 50 cm se caractérise d'abord par des débits un peu plus intenses que la case de 100 cm, mais le débit cumulé de cette dernière est finalement un peu supérieur. On remarquera également, tant sur la figure 2 que sur la figure 3, que le drainage ne réagit qu'aux

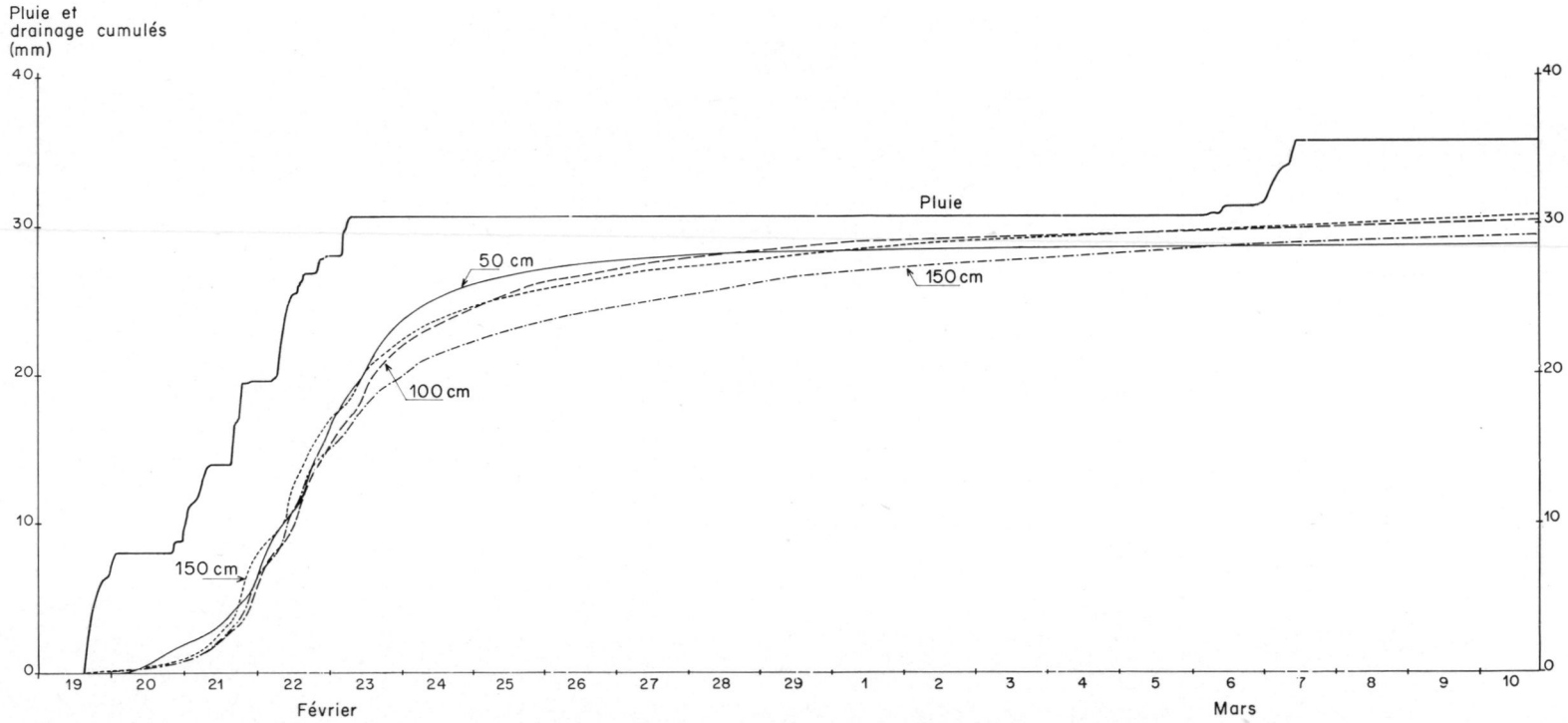



FIG. 2. — *Courbes de précipitations et de drainage cumulés du 19 février au 10 mars 1968*
(saison froide)

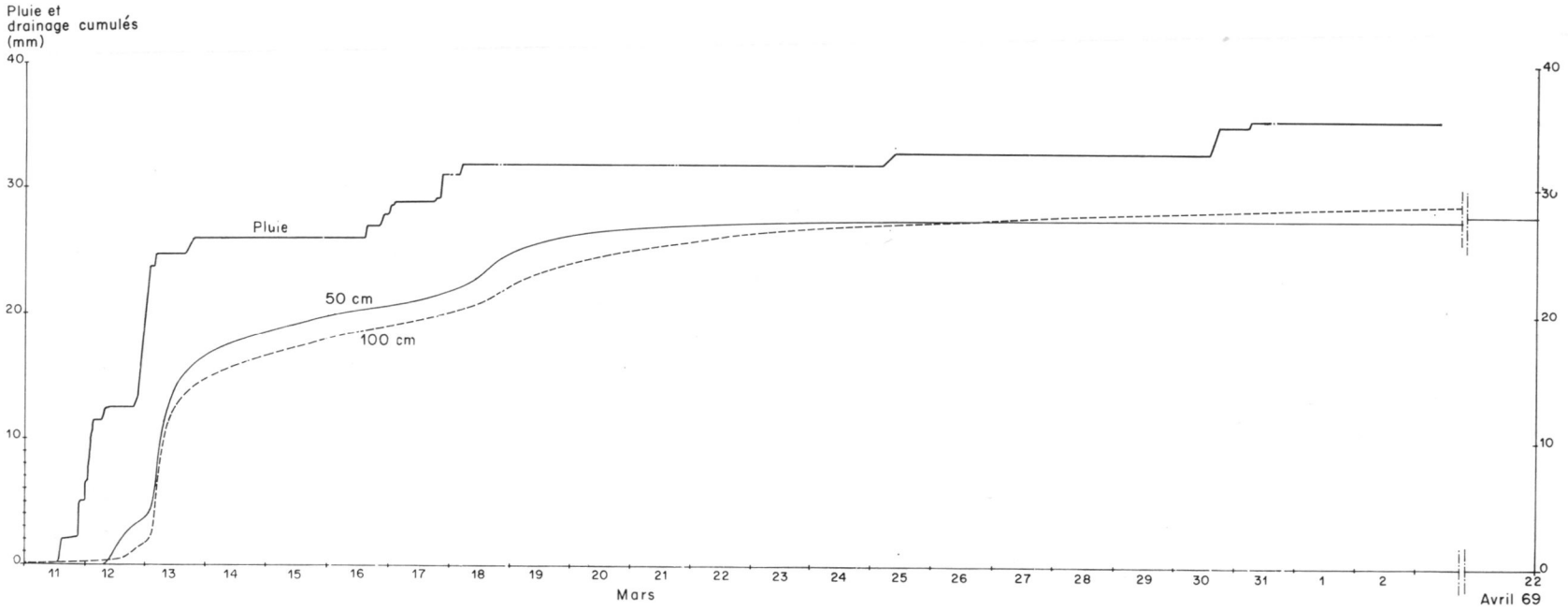



FIG. 3. — *Courbes de précipitations et de drainage cumulés de mars-avril 1969*
(saison tempérée)

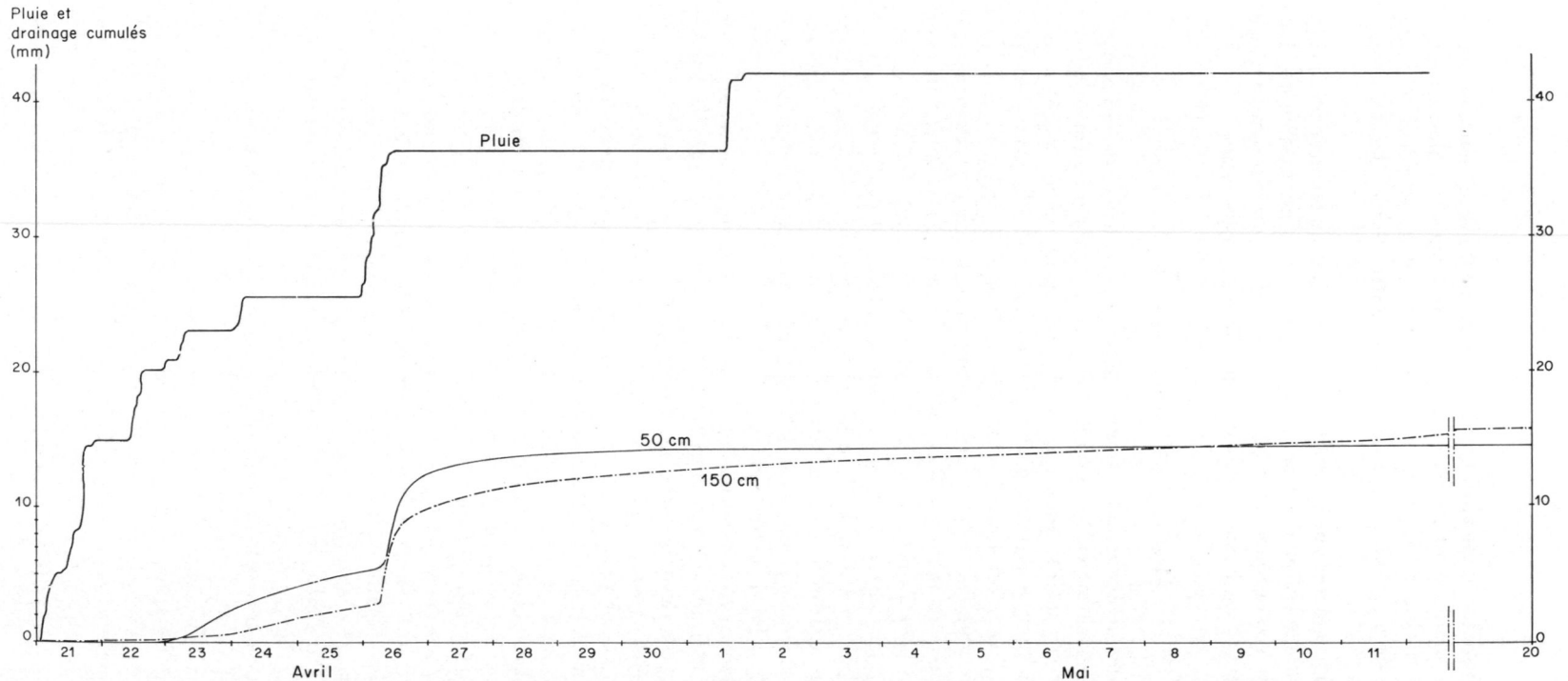



FIG. 4. — *Courbes de précipitations et de drainage cumulés d'avril-mai 1969*
(saison chaude)

fortes précipitations ; c'est ainsi que les précipitations du 6 mars, du 24 mars et du 30 mars ne se manifestent pas au niveau des drainages cumulés. On peut faire les mêmes commentaires au sujet de la figure 4 tant en ce qui concerne l'influence des pluies, que le décalage de vitesse de drainage entre les courbes des cases à 50 et à 150 cm.

Il faut enfin ajouter une remarque générale. Alors que pour le premier graphique, le drainage cumulé est supérieur aux pluies, pour le dernier graphique, il correspond à environ 30 p. 100 des précipitations ; cette différence croît progressivement lorsque la saison avance; c'est là manifestement un effet de l'évaporation.

*Étude à l'aide des courbes de débits classés*

L'étude des débits cumulés suffit à mettre en évidence une différence systématique de comportement en fonction de l'épaisseur de terre traversée par les précipitations. Mais on constate aussi que la réponse du drainage est liée à un processus plus ou moins complexe. C'est pourquoi il a paru utile d'exprimer les phénomènes d'une autre façon. C'est ainsi que, dans le tableau 2, figure, pour deux années, l'une sèche et l'autre humide, et par semestre, le nombre de jours de drainage et la hauteur de drainage correspondant à des écoulements supérieurs ou inférieurs à 0,5 mm en un jour. On constate que la case 4, de faible profondeur, draine intensément (plus que 0,5 mm en un jour) un nombre de jours sensiblement égal à celui des cases plus profondes et pour un débit égal ou légèrement supérieur. Par contre, les cases profondes, 1 m et 1,50 m, ont un nombre de jours de drainage faible très supérieur à celui de la case superficielle et un débit drainé au cours de ces jours beaucoup plus important que celui de cette case.

Si cette façon globale de présenter les résultats permet facilement de mettre en évidence les différences de comportement, l'effet est encore plus marqué quand on utilise les courbes de débits classés. Les graphiques sont construits en portant en ordonnée le débit observé exprimé en mm/jour et, en abscisse, le nombre de jours où un drainage a été observé. Étant donné les différences considérables présentées par les valeurs enregistrées, il a fallu utiliser une échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées. La figure 5, correspondant à une période d'hiver, met bien en évidence l'allure des phénomènes. Il faut préciser que 6 courbes ont été tracées ; 3 correspondent à des cases de 50 cm d'épaisseur, une ayant 2 m² de surface et les deux autres 1 m² de surface, une quatrième à une case ayant 2 m² de surface et 1 m de profondeur et les deux dernières à des cases de 1,50 m de profondeur. Il apparaît clairement que pour les débits supérieurs à 0,5 mm/jour, une seule courbe tend légèrement à se séparer de l'ensemble, elle correspond à la case de 1 m² remplie d'arène granitique. Les autres courbes peuvent être considérées comme sensiblement équivalentes. Par contre, les courbes correspondant à un débit inférieur à 0,5 mm/jour se séparent en deux groupes, l'un correspond aux trois cases de faible profondeur, l'autre aux trois cases de forte profondeur, bien que pour la profondeur 1 m, la courbe soit un peu inférieure à celle correspondant aux épaisseurs de 1,50 m. Cette première constatation montre tout d'abord que les comparaisons effectuées présentent une certaine généralité puisque, pour une profondeur donnée, on enregistre des réactions sensiblement équivalentes et que celles-ci varient systématiquement avec la profondeur. Les mêmes remarques s'appliquent également aux courbes de la figure 6 concer-

TABLEAU 2

*Nombre de jours de drainage et hauteur du drainage*

| | Année 1961-62 | | | | | | Année 1965-66 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Avril-Septembre | | | Octobre-Mars | | | Avril-Septembre | | | Octobre-Mars | | | |
| | Nombre de jours | Drainage (mm) | % du total semestriel | Nombre de jours | Drainage (mm) | % du total semestriel | Nombre de jours | Drainage (mm) | % du total semestriel | Nombre de jours | Drainage (mm) | % du total semestriel | |
| Case 4 50 cm | 25 | 5 | 19 | 80 | 14,5 | 6 | 31 | 5 | 3,9 | 19 | 4 | 1,3 | $q < 0,5$ mm en 1 jour |
| Case 5 100 cm | 66 | 11 | 42 | 88 | 21,5 | 9,4 | 76 | 13 | 9,1 | 54 | 10,5 | 3,2 | |
| Case 8 150 cm | 125 | 16,5 | 53 | 91 | 23,8 | 9,9 | 144 | 25,5 | 17,7 | 88 | 14,3 | 4,3 | |
| Case 4 50 cm | 9 | 20,5 | | 88 | 223,3 | | 25 | 118 | | 85 | 296,5 | | $q \geq 0,5$ mm en 1 jour |
| Case 5 100 cm | 8 | 15 | | 86 | 207 | | 29 | 129,5 | | 92 | 314 | | |
| Case 8 150 cm | 7 | 14 | | 91 | 217 | | 26 | 118 | | 92 | 313 | | |

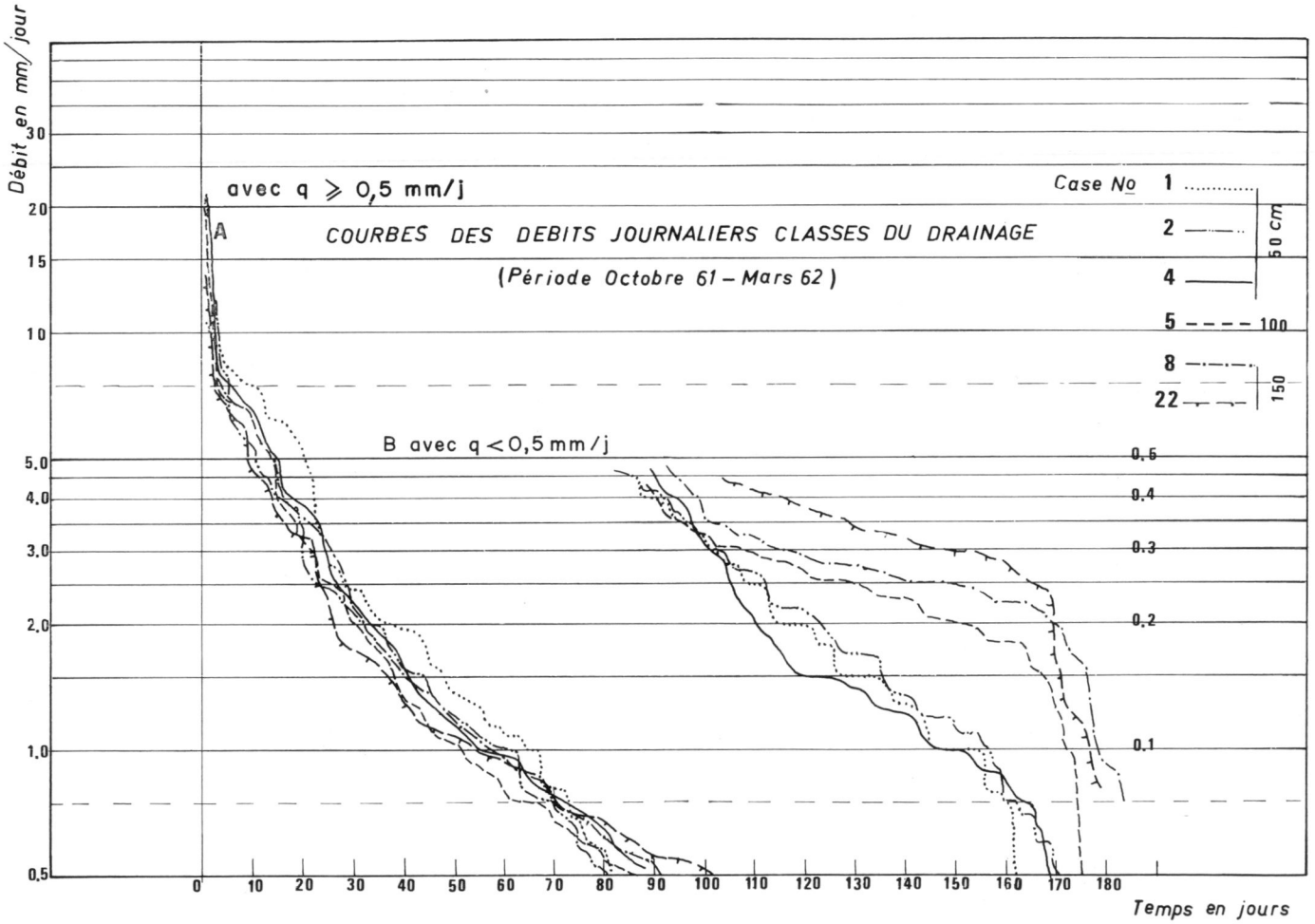

Débit en mm/jour
avec q ⩾ 0,5 mm/j
A
COURBES DES DEBITS JOURNALIERS CLASSES DU DRAINAGE
(Période Octobre 61 – Mars 62)
Case No 1
2
4
5
8
22
50 cm
100
150
B avec q < 0,5 mm/j
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
30
20
15
10
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.5
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
Temps en jours

FIG. 5.

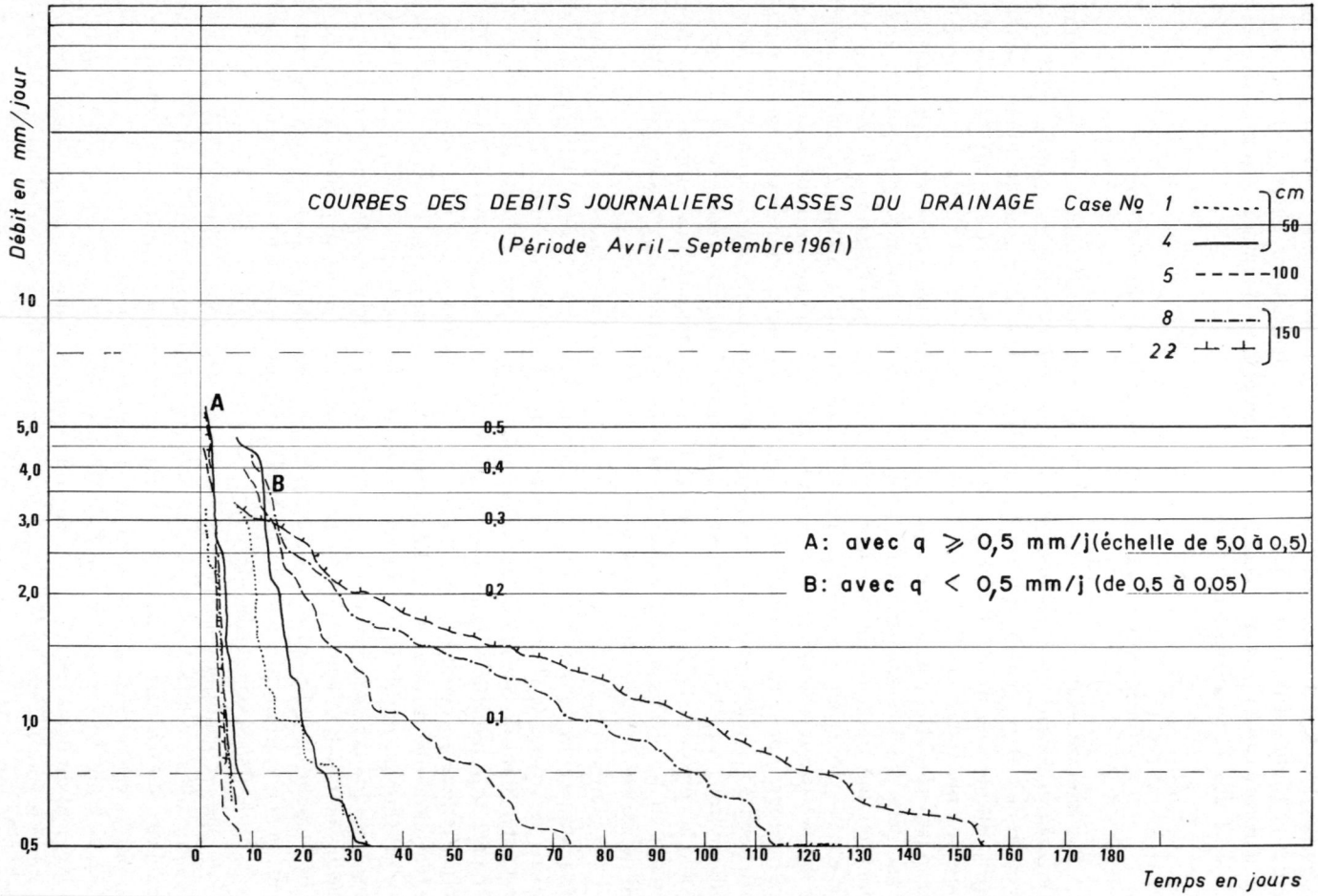

COURBES DES DEBITS JOURNALIERS CLASSES DU DRAINAGE
(Période Avril – Septembre 1961)
Case Nº 1
4
5
8
22
cm
50
100
150
Débit en mm/jour
10
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,5
A
B
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
A: avec q ⩾ 0,5 mm/j (échelle de 5,0 à 0,5)
B: avec q < 0,5 mm/j (de 0,5 à 0,05)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
Temps en jours

FIG. 6.

nant les drainages d'une période estivale. On peut même dire que l'influence de la profondeur, en ce qui concerne les faibles débits, est encore plus marquée que sur la figure 5 ; toutefois il reste difficile d'établir des distinctions entre la façon dont drainent les cases en période d'écoulement intense. C'est pourquoi l'étude a été poursuivie à l'aide d'un enregistrement continu.

*Comparaison des hyétogrammes et des hydrogrammes*

Il a été fait état, dans l'introduction, d'un dispositif de mesure permettant d'enregistrer le drainage d'une manière continue. Mais l'examen des courbes cumulées a permis de mettre en évidence la complexité des phénomènes, puisqu'il peut y avoir superposition d'un drainage résiduel et de celui qui est provoqué par l'arrivée de nouvelles précipitations. L'étude détaillée des phénomènes oblige donc à choisir, parmi les enregistrements, des épisodes constitués par l'existence d'une précipitation se manifestant après une période sans pluie et qui ne soit pas suivie d'une autre pluie avant qu'une fraction suffisamment importante des précipitations précédentes se soit écoulée. De ce fait, un assez petit nombre de cas sont vraiment caractéristiques. La figure 7 présente des exemples typiques. L'allure générale des courbes s'apparente aux hydrogrammes étudiés en hydrologie fluviale. On peut noter en effet que la pluie qui a débuté vers midi le 7 février n'influence pas le drainage avant 4 heures de l'après-midi environ. A partir de ce moment l'écoulement s'intensifie rapidement ; il correspond à la période de concentration, puis après un maximum, qui se produit d'ailleurs après la fin des précipitations, le diagramme présente une allure grossièrement hyperbolique ; c'est la courbe de tarissement.

Un premier point est à noter : le sommet des hydrogrammes présente toujours une pointe aiguë, ce qui veut dire qu'en aucun cas le sol n'a été saturé, ou qu'on n'avait pas atteint la vitesse limite de transfert de l'eau dans le milieu. D'autre part, il est intéressant de considérer la position relative des hydrogrammes. Ils se classent ici dans l'ordre inverse de celui que l'on aurait pu attendre, puisque le débit le plus intense et le temps de réponse le plus court correspondent à la case la plus profonde, l'intensité des débits décroissant d'autre part avec la profondeur des cases. C'est que si ce graphique a été choisi en raison de la netteté des courbes, il correspond mal aux situations que l'on a spécifiées ci-dessus : il s'agit ici d'un cas où le débit initial est relativement élevé, l'épisode pluvieux s'est produit peu après le précédent ; au contraire, lorsque les précipitations surviennent après une période de ressuyage suffisamment longue, c'est la case la moins profonde qui présente le temps de réponse le plus court et le débit maximum le plus intense.

L'analyse des résultats repose sur le concept de temps de réponse, TR ; il s'agit de l'intervalle de temps qui sépare le début des précipitations du début de la branche montante de l'hydrogramme. Cette mesure va permettre de calculer une vitesse de transfert, c'est la valeur $L/TR$, $L$ étant l'épaisseur de la case.

L'ensemble des mesures effectuées montre que le temps de réponse dépend étroitement du débit initial, c'est-à-dire du débit des drains au moment où les précipitations se sont mises à tomber. La figure 8 montre l'allure hyperbolique du phénomène, le temps de réponse diminuant rapidement à mesure qu'augmente l'intensité du drainage initial.

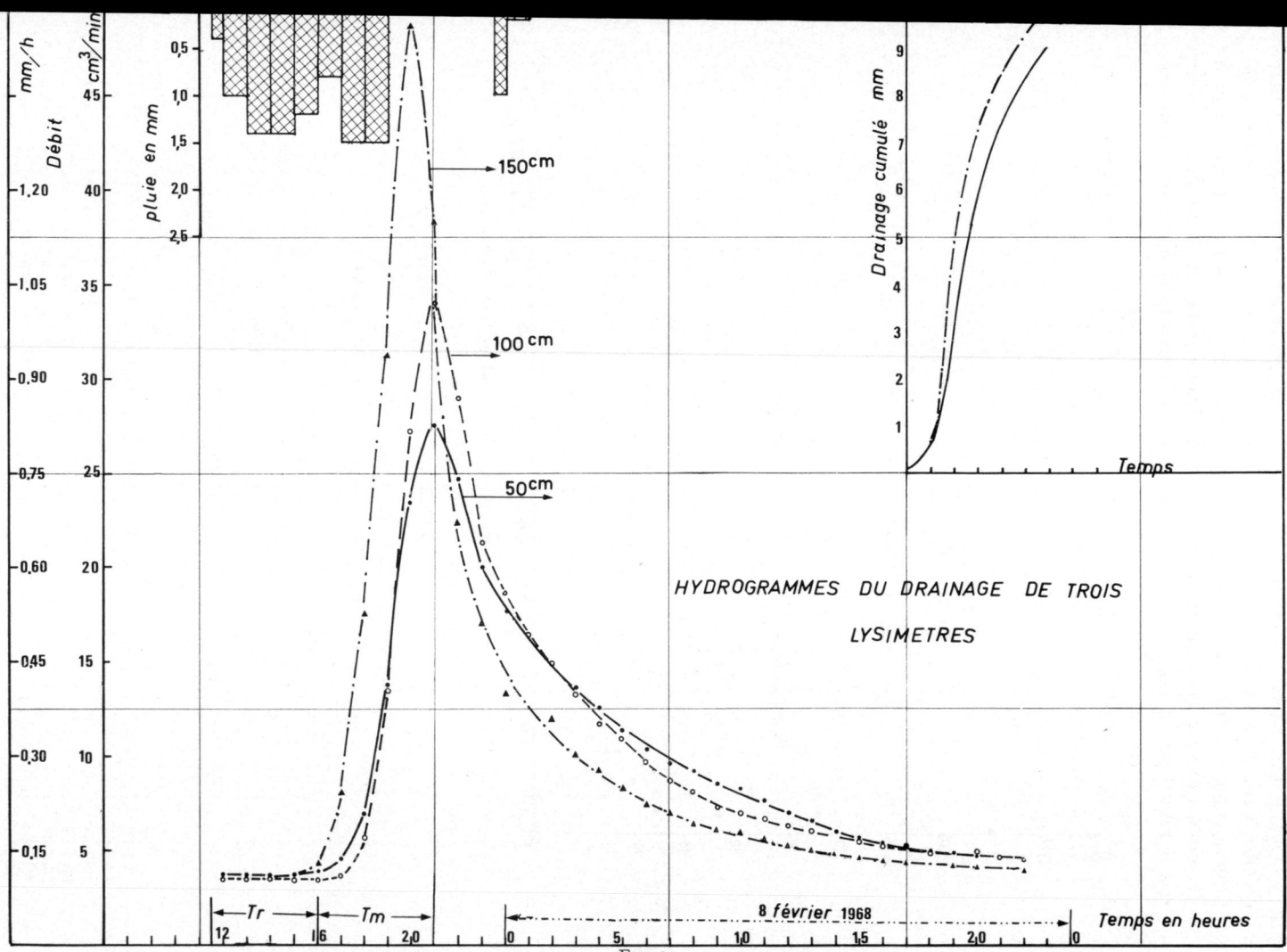

mm/h
Débit
cm³/min
1,20
1,05
0,90
0,75
0,60
0,45
0,30
0,15
40
35
30
25
20
15
10
5
pluie en mm
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
150cm
100 cm
50cm
Drainage cumulé mm
9
8
7
6
5
4
3
2
1
Temps
HYDROGRAMMES DU DRAINAGE DE TROIS
LYSIMETRES
Tr
Tm
12
6
2,0
8 février 1968
0
5
1,0
1,5
2,0
0
Temps en heures

FIG. 7.

Quant aux vitesses de transfert exprimées en cm/heure, le tableau 3 montre qu'elles varient assez systématiquement, étant plus faibles pour la case de faible profondeur que pour la case profonde. Par ailleurs, cette vitesse tend également à décroître à mesure que l'on se rapproche de la période sèche, ce qui tend à montrer que le retard serait, dans ce cas, dû au fait que le sol non saturé en surface retient une

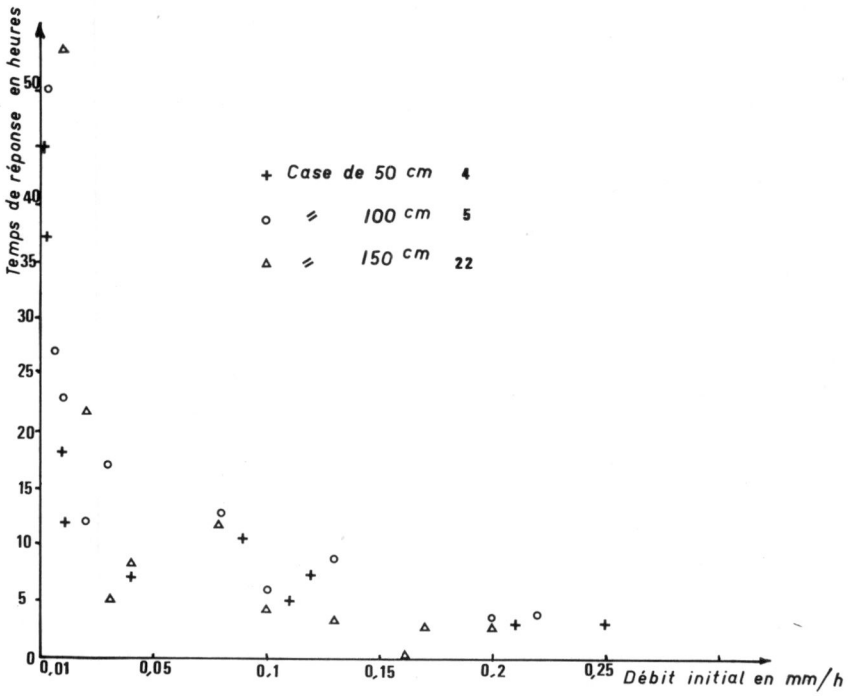



FIG. 8. — *Variations du temps de réponse en fonction du débit initial*

TABLEAU 3

*Vitesse de « transfert » de l'eau*

($q_i$ = débit initial; $Vf$ = L/Tr = vitesse de transfert)

| Date | Pluie | | Case 4 50 cm | | Case 5 100 cm | | Case 22 150 cm | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Hauteur (mm) | Intensité (mm/h) | $q_i$ (mm/h) | $V_f$ (cm/h) | $q_i$ (mm/h) | $V_f$ (cm/h) | $q_i$ (mm/h) | $V_f$ (cm/h) |
| 8-2-68 | 2,5 | 0,55 | 0,120 | 6,89 | 0,130 | 11,4 | 0,13 | 31,57 |
| 13-2-68 | 8,0 | 1,10 | 0,027 | 6,25 | 0,030 | 8,69 | 0,030 | 17,64 |
| 20-2-68 | 8,1 | 0,90 | 0,005 | 4,16 | 0,020 | 4,76 | 0,020 | 6,81 |
| 21-2-68 | 6,6 | 0,66 | 0,090 | 4,87 | 0,080 | 8,00 | 0,080 | 12,50 |
| 25-3-68 | 6,3 | 0,70 | 0,010 | 4,15 | 0,030 | 5,85 | — | — |
| 21-4-69 | 19,0 | 4,60 | 0,000 | 1,11 | 0,008 | 1,96 | 0,010 | 2,54 |

certaine quantité d'eau avant que l'apport des précipitations n'atteigne la zone drainante.

Si l'on compare ces valeurs et celles obtenues par FÉODOROFF (1970), on constate qu'elles sont sensiblement du même ordre de grandeur. Or, cet auteur avait déterminé les vitesses de transfert en plaçant des tensiomètres à deux profondeurs dans le sol.

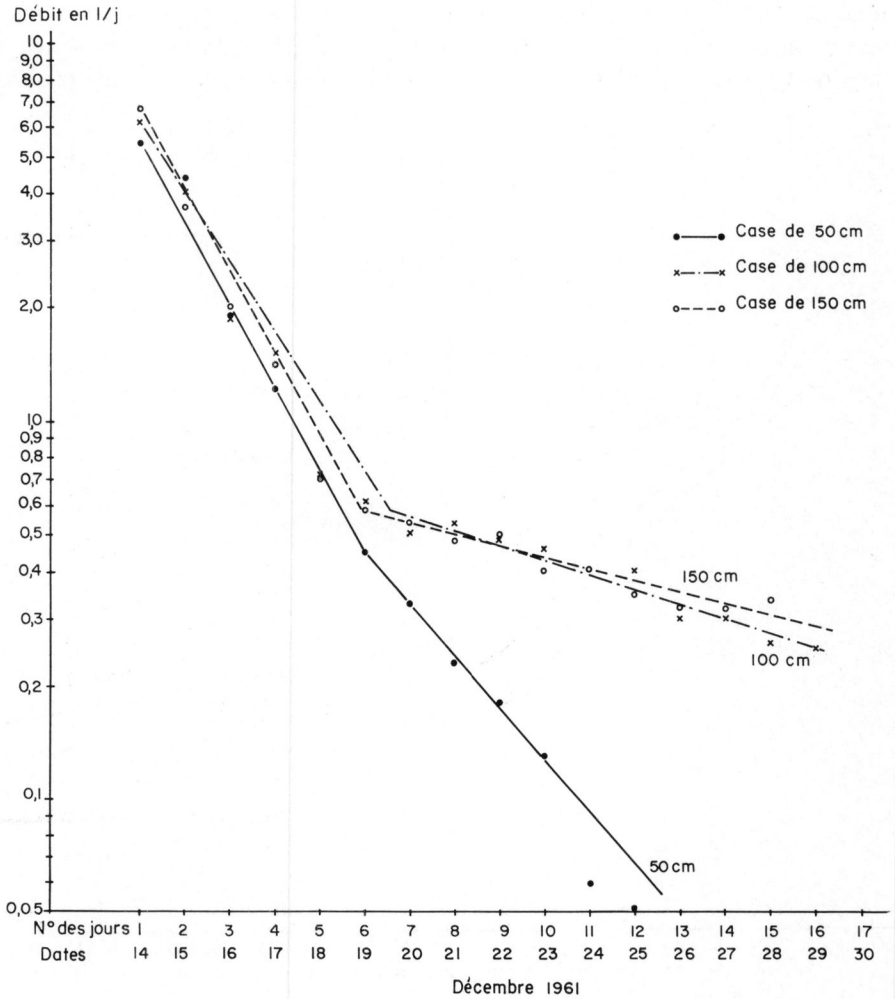



FIG. 9. — *Courbes de tarissement des débits journaliers de cases lysimétriques* (origine : 14 décembre 1961)

Dès que l'écoulement atteignait l'un des appareils, la pression tombait, il était donc facile de mesurer l'intervalle de temps séparant la réaction des deux appareils. Les vitesses ainsi mesurées s'étalaient de 3,1 à 8,33 cm/heure.

Ces courbes permettent également d'évaluer les vitesses de filtration ; les plus grands débits instantanés de drainage qui ont été observés correspondent à $9{,}2 \cdot 10^{-5}$ cm/sec pour la case de 1,50 m, $6{,}1 \cdot 10^{-5}$ cm/sec pour la case de 1 m et

$5{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm/sec pour la case de 50 cm. Ensuite les débits tombent rapidement à de faibles valeurs, devenant inférieurs à 0,5 mm/j (soit $0{,}06 \cdot 10^{-5}$ cm/sec) 2 à 4 jours après l'arrêt de la pluie, et au tiers de cette valeur au bout d'un temps variable selon la profondeur des cases.

La dernière branche de l'hydrogramme, d'allure hyperbolique, correspond à ce que l'on appelle « courbes de tarissement ». Pour en faciliter l'étude, on essaye en général de l'ajuster à une fonction exponentielle de la forme $Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$. Pratiquement on ajuste une courbe semi-logarithmique aux points expérimentaux. Les figures 9 et 10 présentent deux séries de courbes de ce type. L'origine choisie se

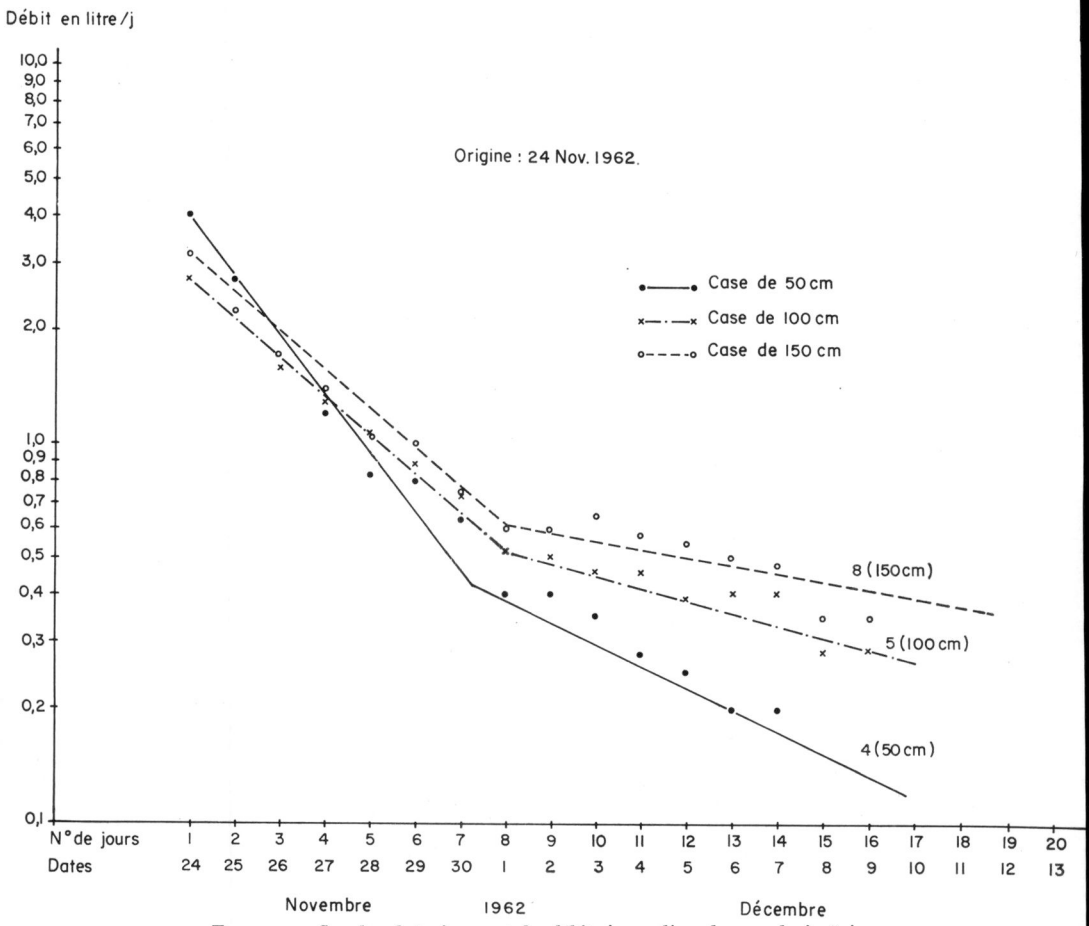



FIG. 10. — *Courbes de tarissement des débits journaliers de cases lysimétriques* (origine : 24 novembre 1962)

confond avec le maximum de l'hydrogramme. On constate que les points s'alignent en fait autour de deux familles de droites différentes, la cassure se produisant pour des écoulements de l'ordre de 0,5 l/jour (environ 0,25 mm en 24 h). L'existence de cette cassure montre qu'il existe deux phénomènes différents au cours du tarissement et justifie par conséquent l'analyse effectuée précédemment en considérant par

exemple les courbes de débit cumulé. On peut noter en particulier, pour les groupes de droites dont la pente est la plus faible, le même classement que précédemment, c'est-à-dire que les cases se ressuient d'autant plus vite qu'elles sont moins profondes.

Le fait que les courbes, au moins en partie, suivent une loi simple, permet, à certains stades, d'évaluer par extrapolation la quantité d'eau qui reste à évacuer ; soit $v$ son volume, on peut écrire :

$$v = \int_0^{+\infty} q \, dt = q_0 \qquad \int_0^{+\infty} e^{-\alpha t} \, dt = \frac{q_0}{\alpha}$$

Voici quelques résultats numériques :

| Profondeur de la case ..... | 50 cm | 100 cm | 150 cm |
|---|---|---|---|
| $q_0$ le plus élevé..... | 1,98 mm/h | 2,2 mm/h | 3,3 mm/h |
| $\alpha$ ..... | 0,236 | 0,234 | 0,260 |
| $v \left(= \frac{q_0}{\alpha}\right)$..... | 16,8 l | 20,0 l | 25,4 l |

Les valeurs les plus élevées obtenues pour $\frac{q_0}{\alpha}$ ont été celles qui correspondent aux plus élevées obtenues pour $q_0$, ce sont donc celles du tableau ci-dessus ; on voit que, néanmoins, il s'agit de volumes peu importants par rapport à la porosité totale des cases ; on retrouvera ce résultat, dans la 2e partie, avec les « bacs ».

Enfin, la décroissance de la valeur de $\alpha$ au cours d'un même épisode de tarissement (décroissance qui traduit le fait que la courbe de tarissement, prise dans sa totalité, n'est pas exponentielle) sera reliée, dans la suite de cet article, à la distribution des pores.

## DEUXIÈME PARTIE

## ÉTUDE EN BACS EXPÉRIMENTAUX

Comme on n'est pas maître de la fréquence des pluies dans les cases lysimétriques et que, d'autre part, le manque de répétitions pouvait faire craindre que certaines singularités n'aient été liées aux propriétés fortuites de chacune des cases, il a paru nécessaire de vérifier les données précédentes. Dans ce but, des cylindres en matière plastique de 300 mm de diamètre ont été remplis de terre à peu près identique à celle des cases de manière à constituer des couches de 50 cm, 100 cm et 150 cm. Ces matériaux reposaient sur un fond drainant. Étant donné les petites dimensions de ces éléments, ils ont été noyés dans une matière isolante; des thermomètres ont été introduits dans la terre à différentes profondeurs pour mesurer la température. Le remplissage s'est effectué sous eau, comme cela avait été fait pour les cases lysimétriques, c'est-à-dire qu'après avoir introduit une certaine couche de liquide dans chacun des cylindres, de la terre sèche y a été versée jusqu'à ce que son niveau soit proche de celui du liquide, une nouvelle couche d'eau était alors ajoutée et l'opération continuée jusqu'à remplissage complet. Par ce procédé, la terre se délite et, comme il n'y a qu'une faible épaisseur d'eau, il n'y a pratiquement pas de séparation

par sédimentation. Vingt-quatre heures après le remplissage, les tubes ont été vidangés, pesés et l'on a pu ainsi déterminer les valeurs suivantes qui caractérisent les propriétés physiques de ces filtres :

| | | | |
|---|---|---|---|
| densité apparente ..... | 1,31 | à | 1,35 |
| porosité ..... | 48 | à | 49 p. 100 |
| capacité de rétention dans les bacs ..... | 44 | à | 48 p. 100 |

La courbe « de vidange » (c'est-à-dire celle qui concerne le premier ressuyage, celui qui suit le remplissage du bac) apporte déjà certaines informations importantes. On distingue encore une phase rapide et une phase lente, et au cours du premier jour, la vidange représente 75 p. 100 du total pour le bac de 150 cm et 96 p. 100

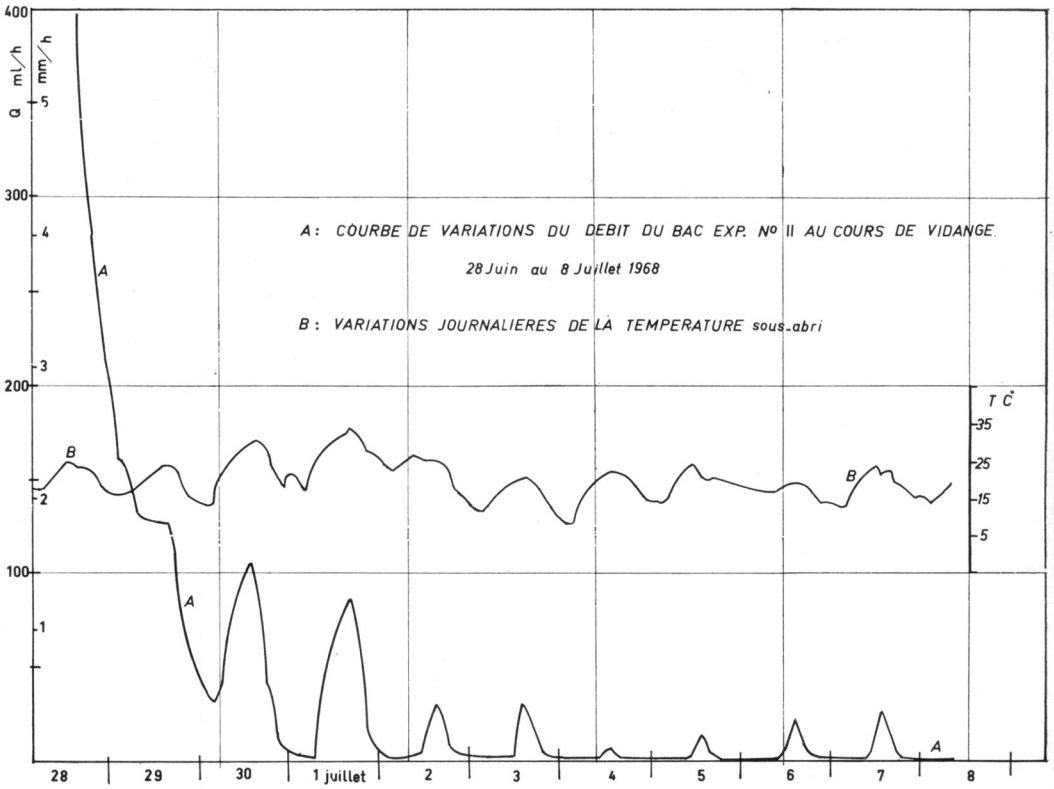



FIG. 11.

pour le bac de 50 cm. Mais ce qui est remarquable, c'est que la partie de la courbe correspondant au faible débit présente une série de maxima très accentués ; quand on compare cette courbe et celle des températures, on constate une coïncidence très nette entre les remontées de la courbe de drainage et les élévations de température, ce qui permet de conclure qu'il existe une relation de cause à effet entre les deux phénomènes (figure 11).

Ces dispositifs sont bien entendus placés à l'abri, et l'expérimentateur peut apporter l'eau quand il le désire. Dans ces conditions, les résultats sont particulière-

ment nets et vérifient les conclusions tirées de l'observation du drainage des cases quand celles-ci sont bien ressuyées. L'allure générale des hydrogrammes s'apparente étroitement à ceux obtenus en suivant le drainage des cases lysimétriques, ainsi qu'on peut le constater en examinant les figures 12 et 13. On remarquera toutefois que les hydrogrammes présentent cette fois-ci un maximum aplati pour un des deux bacs de 0,50 m, alors que celui-ci est à peine marqué pour les cases profondes de 1,50 m. Il est d'ailleurs curieux de constater que l'existence de la saturation se manifeste pour des débits inférieurs à ceux des diagrammes présentant un sommet aigu ; peut-être faut-il voir là une conséquence de l'emprisonnement de l'air dans les pores du sol, emprisonnement qui ne peut apparaître qu'au voisinage de la saturation. Il faut également constater que si la branche ascendante et le début de la courbe de tarissement sont bien marqués, par contre, la fin des écoulements présente des sinuosités correspondant aux variations de température, fait qui a déjà été signalé. Cette circonstance empêche l'étude précise de la fin des courbes de tarissement.

Quant aux courbes de drainage cumulé, si elles présentent une courbure nettement dessinée pour les bacs de faible profondeur, elles s'élèvent très progressivement pour les bacs profonds. C'est ainsi que la durée totale du drainage, plus précisément l'intervalle de temps qui sépare son apparition et le moment où il devient inférieur à 1/7 de mm par jour (on n'observe alors pratiquement plus aucun drainage), varie avec la profondeur de la manière suivante :

30 h à 7 jours pour les bacs de 50 cm
32 h à 8 jours pour le bac de 100 cm
50 h à 13 jours pour les bacs de 150 cm

Les temps de réponse mesurés dans ces conditions varient de la manière suivante :

1/4 h à 1 h pour les bacs de 50 cm
1/2 h à 2 h pour le bac de 100 cm
2 h à 11 h pour les bacs de 150 cm

Aux mêmes profondeurs, la variation du temps de réponse dépend de l'intensité des apports d'eau ; certains ont été effectués d'une manière quasi instantanée, alors que, dans d'autres cas, la même quantité d'eau a été apportée en 8 heures.

Les débits de pointe se classent dans le même ordre :

pour 50 cm 8 mm/h (560 ml/h)
pour 100 cm 4 mm/h (300)
pour 150 cm 1,5 mm/h (100)

c'est bien celui qui avait été constaté sur les cases lysimétriques lorsque les précipitations survenaient après une longue période de ressuyage.

Le nombre de jours de drainage vérifie également les résultats précédents, comme d'ailleurs les quantités d'eau écoulées en drainage intense et en drainage lent. C'est ainsi que les bacs les plus profonds drainent de 87 à 89 p. 100 de leur eau avec un débit supérieur à 0,5 mm/jour alors que, pour le même débit, il s'écoule 94 et 95 p. 100 de l'eau à drainer dans les bacs ayant 50 cm de profondeur.

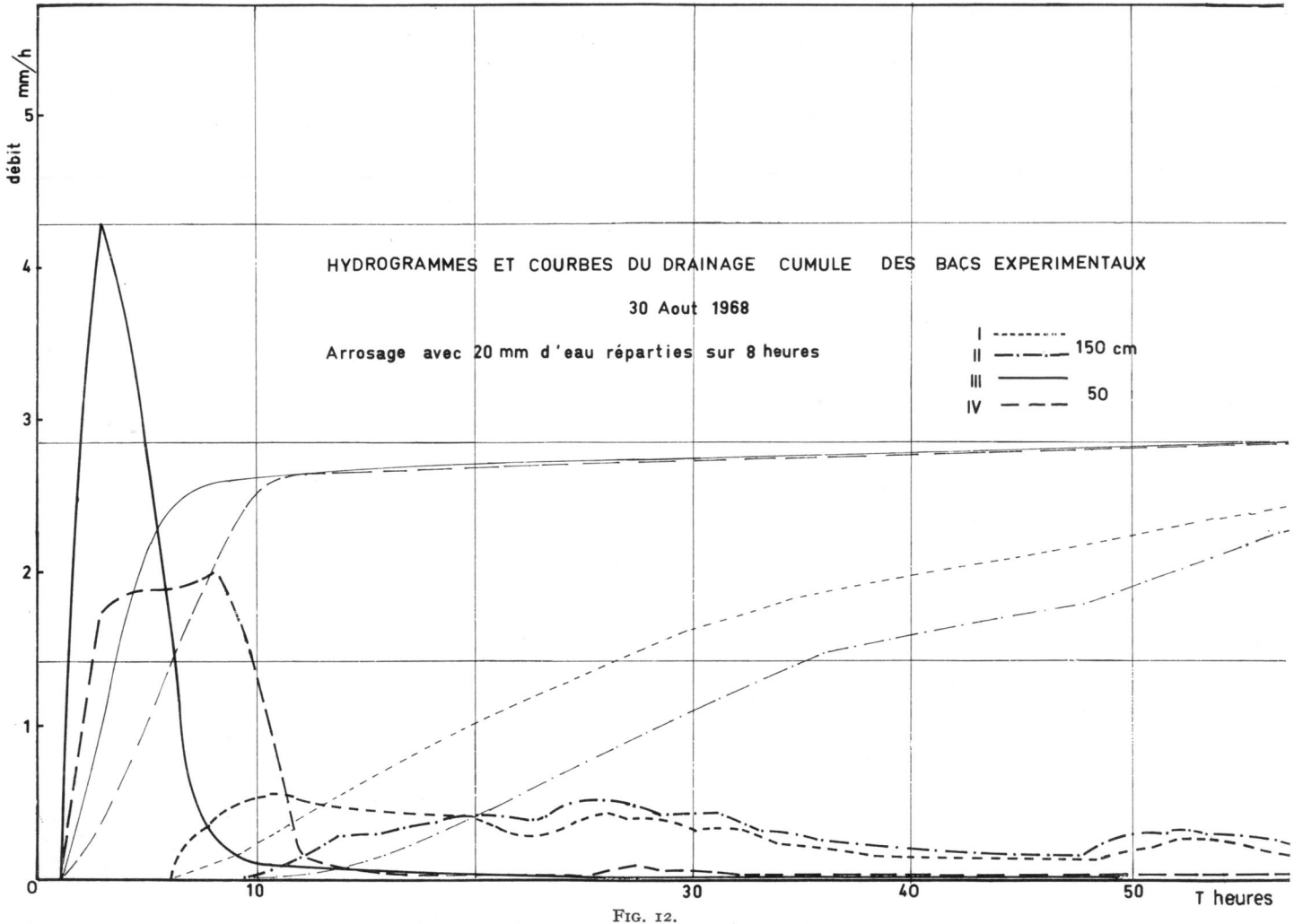

débit mm/h
5
4
3
2
1
0
10
30
40
50
T heures
HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX
30 Aout 1968
Arrosage avec 20 mm d'eau réparties sur 8 heures
I
II
III
IV
150 cm
50

FIG. 12.

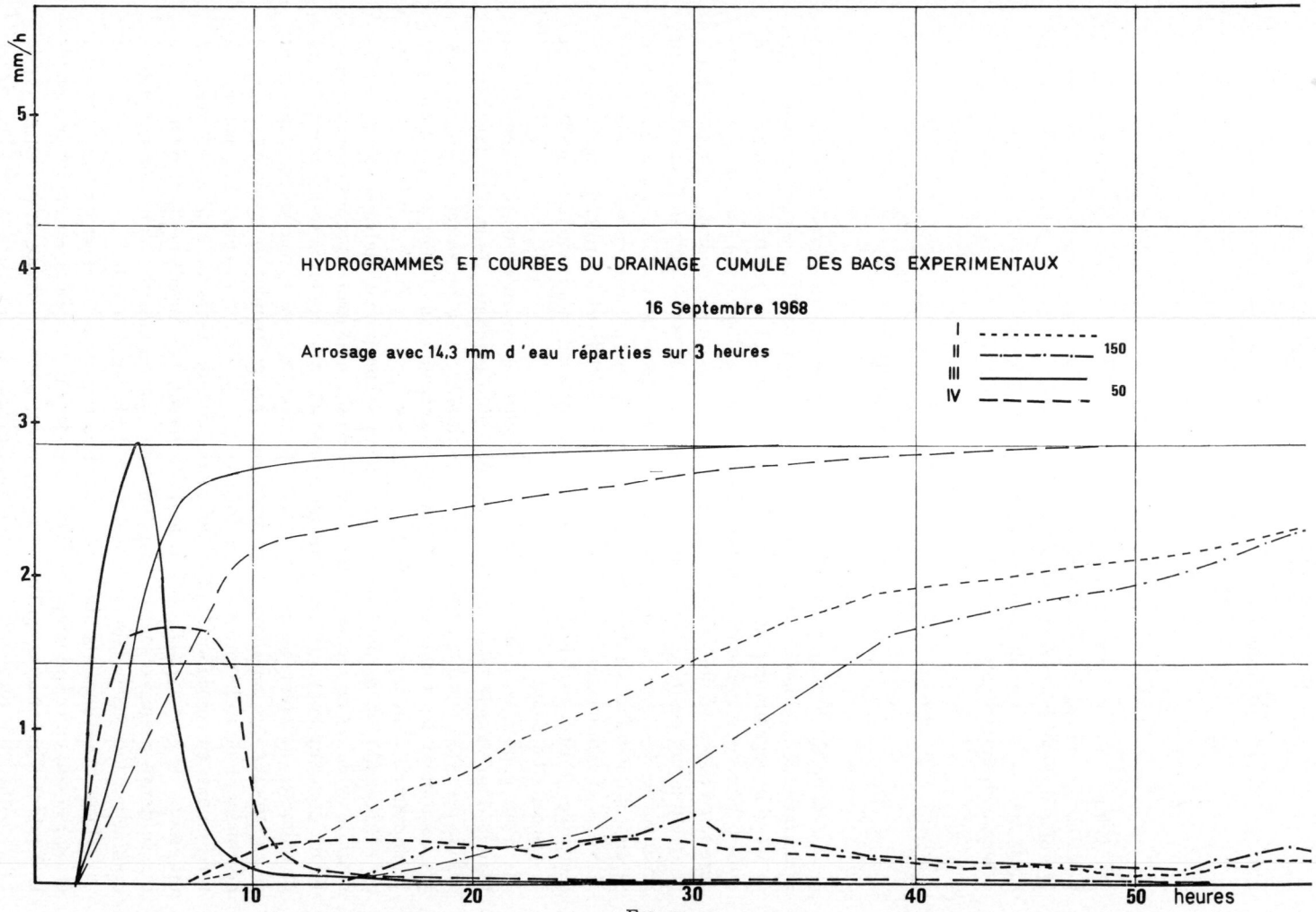

mm/h
5
4
3
2
1
HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX
16 Septembre 1968
Arrosage avec 14,3 mm d'eau réparties sur 3 heures
I
II
III
IV
150
50
10
20
30
40
50
heures

FIG. 13.

Enfin, l'étude des valeurs $q_0$ et $v$ aboutit aux résultats suivants :

| Profondeur du bac ..... | 0,50 m | 0,50 m | 1,50 m |
|---|---|---|---|
| $q_0$ ml/h ..... | 480 | 400 | 115 |
| $\alpha$ ..... | 0,605 | 0,460 | 0,035 |
| $v$ ml ..... | 793 | 867 | 3 290 |

Comme les bacs ont été presque saturés au cours de certaines expériences, il est possible de comparer ces volumes à la porosité totale ; dans les bacs peu profonds, le volume d'eau qui draine en représente à peine 5 p. 100 et pour les bacs profonds 6,5 p. 100 ; la faiblesse de ces valeurs confirme l'impression que donnaient les résultats des cases lysimétriques.

## TROISIÈME PARTIE

L'étude du drainage en cases lysimétriques et en bacs expérimentaux a fait apparaître deux singularités : d'une part, l'existence de deux phases de ressuyage, la seconde dépendant nettement de la profondeur de sol en cause, d'autre part, et nous n'avons observé ce fait que pour les bacs, une influence marquée de la température sur l'intensité des faibles débits. Diverses hypothèses peuvent être présentées pour expliquer ces résultats. Dans le premier cas, il peut s'agir de l'allure de tout phénomène de ressuyage ou d'un effet dû à la distribution de la porosité, dans le second, d'une influence de la température sur une ou plusieurs propriétés de l'eau : PENMAN et SCHOFIELD (1941) avaient montré en étudiant le drainage de cases lysimétriques à diverses saisons qu'il existait une corrélation étroite entre les débits et la viscosité de l'eau.

Pour choisir entre les différentes possibilités ainsi énoncées, il a semblé que l'étude d'un modèle très simple, la vidange d'un capillaire, puis d'un faisceau de capillaires ayant des diamètres différents, était susceptible de fournir des arguments. En combinant les formules de Jurin et de Poiseuille on obtient une relation entre la hauteur de l'eau dans un capillaire et le temps.

Le calcul montre que l'allure de la vidange d'un tube cylindrique (ou d'un faisceau de cylindres de même diamètre) ne s'accorde nullement avec les observations ; il faut donc supposer que l'écoulement se produit à travers un faisceau de capillaires de diamètres différents les uns des autres, et présentant une tortuosité marquée, pour se rapprocher des conditions expérimentales. En particulier, on peut expliquer la décroissance de $\alpha$ (le terme $\alpha$ de la formule $q = q_0 \cdot e^{-\alpha t}$) au cours d'un épisode de tarissement, en considérant qu'au début, la majeure partie du débit est assurée par un groupe de gros capillaires dont le débit décroît très rapidement, et qu'à mesure que le temps passe, ce sont des capillaires de plus en plus fins dont l'influence prédomine ; or, dans ce cas, la décroissance du débit est plus lente.

On peut expliquer la différence de comportement entre cases ou bacs de 50 cm et de 150 cm, en ce qui concerne l'évolution des faibles débits, en faisant intervenir la hauteur d'ascension capillaire. Par exemple, pour des tubes ayant un rayon de 12 $\mu$ (ce qui donne une hauteur d'ascension capillaire de 125 cm), ceux dont la hauteur

est de 150 cm se vident sur 25 cm, alors que ceux qui n'ont que 50 cm de hauteur voient leur écoulement s'arrêter brutalement dès que cesse l'alimentation en eau ; ainsi, quand le drainage a cessé dans le tube court, il se poursuit avec le tube long. Cela signifierait aussi que les sols peu profonds retiennent plus d'eau au voisinage de leur surface que les sols profonds, ce qui pourrait d'ailleurs expliquer que le déficit d'écoulement y soit plus prononcé, l'excès d'eau proche de la surface étant plus exposé à l'évaporation.

En ce qui concerne la température, un simple exemple numérique permettra d'apprécier l'influence de ce facteur. Entre 15 et 17°C (1), la viscosité varie de 6 p. 100 environ, ce qui est très inférieur aux différences observées ; par contre, la variation de la tension superficielle entraînerait, pour un capillaire de rayon 50 μ, une variation d'ascension capillaire de 1,5 mm ; cette différence exercerait, au stade où l'écoulement est presque achevé, un effet voisin de tout ou rien ; il semble donc compatible avec ce qui a été observé. Évidemment, il faudrait imaginer qu'entre chaque accroissement de débit et le suivant, le niveau de l'eau remonte dans les capillaires, ce qui est concevable dans les sols, du fait de l'écoulement lent du liquide, sous forme de films, le long des parois. Ainsi il semble que les singularités qui apparaissent sur la seconde partie de la courbe de ressuyage puissent être attribuées aux variations de la tension superficielle sous l'influence des oscillations de la température, mais il convient de remarquer que cet effet se manifeste d'une façon tout à fait particulière, un peu à la manière d'un clapet, et qu'il n'intéresse qu'une faible fraction de l'eau drainable.

## CONCLUSION

Ainsi, l'étude de l'écoulement des cases lysimétriques apporte un certain nombre de précisions concernant le comportement de l'eau non saturante dans les sols. Il est remarquable de constater que sous le climat parisien, on n'observe qu'exceptionnellement une saturation du sol, c'est ce que l'on peut déduire de la forme des hydrogrammes. Les débits de pointe observés sont de l'ordre de 3 à 4 mm/heure ; toutefois la vitesse de transfert, si elle dépend bien de l'épaisseur de la couche traversée, n'en est pas moins très variable avec l'état d'humidité du sol ; lorsque celui-ci est mal ressuyé l'influence de la profondeur sur la vitesse de transfert s'accentue au point que le temps de réponse ne dépend plus sensiblement de l'épaisseur de la couche de terre traversée. Il faut noter que les vitesses de transfert qui ont été déterminées en sol ressuyé sont du même ordre de grandeur que celles mesurées par FÉODOROFF, à l'aide de la réaction de tensiomètres placés à diverses profondeurs. Il semble donc que les résultats observés dans les cases soient extrapolables aux observations effectuées *in situ* ; il en va de même en ce qui concerne la faiblesse de la fraction d'eau mobile dans le sol à un moment donné.

De 85 à 95 p. 100 de l'eau se trouve drainé très rapidement, le reste est évacué lentement, et ceci d'autant plus que la couche de terre traversée est plus profonde ;

(1) On a observé dans la terre des bacs des oscillations diurnes de température dont l'amplitude est de 3°C environ.

la quantité totale d'eau drainée semble un peu supérieure dans ce dernier cas. Enfin, les variations de température peuvent provoquer des oscillations de débit en fin de ressuyage, probablement en modifiant la valeur de l'ascension capillaire.

*Reçu pour publication en octobre 1971.*

## SUMMARY


### STUDY OF FLOW IN LYSIMETERS

This study deals with the flow of non-saturating gravity water in the soil ; it applies to bare-ground lysimeters 50 cm, 100 cm, 150 cm deep ; « tanks » similar to these lysimeters, although smaller in surface area, were also used. They were sheltered from precipitations and fed with water artificially.

The shape of the drainage hydrograms shows that, in the Paris region climate, saturation of the loam used is observed only exceptionally ; the peak rates of outflow observed are of about 3 to 4 mm/hour. The transfer rate, which is higher in deep lysimeters than in shallow lysimeters, varies greatly with the initial humidity, so that the differences in the behaviour of 150 cm and 50 cm deep lysimeters are related to the proximity of the preceding rainy period. It should be noted that the transfer rates determined are of the same order of magnitude as those measured by FEODOROFF in the field by means of tension-meters located at different depths ; it therefore seems that the results observed in lysimeters may be transposed to the field.

85 to 95 p. 100 of the water is drained very rapidly, the remainder is drained slowly and all the more so as the soil layer is deeper ; thus, 2 or 4 days after a rainfall sufficient to yield a total drainage higher than 5 mm, the daily drainage has returned to less than 1/2 mm ; 2 to 4 days later, it becomes negligible in 50 cm deep lysimeters (less than 0,15 mm per day, and soon nil or substantially nil). On the other hand, this phase lasts for about ten days in 100 cm deep lysimeters and still more in 150 cm deep ones. (To give an indication of the magnitude of drainages of less than 1/2 mm per day, it should be noted that for 50 cm lysimeters, they correspond to about one tenth of the total yearly drainage). Lastly, in the tanks, temperature variation may produce daily rate fluctuations at the end of drainage, probably by modifying the water surface tension.


## ZUSAMMENFASSUNG


### UNTERSUCHUNG DER WASSERBEWEGUNG IN LYSIMETERN

Diese Untersuchung betrifft die Bewegung des nicht sättigenden Gravitationswassers im Boden. Sie bezieht sich auf Lysimeter im unbewachsenen Boden : die eingesetzten Tiefen betragen 50 cm, 100 cm, 150 cm. Die diesen Lysimetern entsprechenden « Kammern » weisen geringere Fläche auf und wurden ebenfalls verwendet. Letztere weren gegen die Niederschlagsmengen geschützt und künstlich mit Wasser versorgt.

Die Form der Dränierungshydrogramme zeigt, dass unter dem Pariser-Klima eine Sättigung des verwendeten Lahmes nur aus nahmsweise stattfindet ; die beobachteten Spitzenabflussmengen wechseln zwischen 3 bis 4 mm/h. — Die Uebertragungsgeschwindigkeit, die in den tiefen Schichten grösser ist als in den weniger Tiefen, wechselt erheblich je nach der Anfangsfeuchtigkeit, so dass die Verhaltensunterschiede zwischen den 150 cm und den 50 cm tiefen Messungen von der Zeitspann seit der letzten regnerischen Periode abhängig sind. Es sei bemerkt, dass die festgestellten Uebertragungsgeschwindigkeiten in derselben Grössenordnung liegen wie die von FEODOROFF auf offenem Felde mit verschiedenen Tiefen eingesetzten Tensiometern gemessenen. Infolgedessen scheint es, dass die in den Fächern beobachteten Ergebnisse auf Felduntersuchungen übertragbar sind.

85 bis 95 p. 100 des Wassers wird sehr rasch drainiert, das Uebrige wird langsam abgeführt und dies um so mehr als die durchquerte Bodenschicht tiefer liegt. Zum Beispiel, wenn es genug geregnet hat um eine gesamte Drainierung von mehr als 5 mm zu haben, wird nach 2 bis 4 Tage die tägliche Drainierung wieder geringer als 1/2 mm ; nach 2 bis 4 weiteren Tagen wird sie für die 50 cm tiefen Fächer vernachlässigbar (niedriger als 0,15 mm pro Tag und bald fast null). Dagegen dauert diese Phase etwa zehn Tage für die 100 cm und noch mehr für die 150 cm tiefen

Fächer (um die Bedeutung der Dränierungen von weniger als 1/2 mm pro Tage zu schätzen, wird angegeben, dass sie bei den 50 cm tiefen Fächern ungefähr 1/10 der gesamten jährlichen Dränierung sicherstellen).

Was die « Kammern » anbetrifft, so können hier die Temperaturänderungen am Schluss der Entwässerung, tägliche Abfluss-schwingungen hervorrufen, die wahrscheinlich einer Anderung der Oberflächenspannung des Wassers zuzuschreiben sind.

## РЕЗЮМЕ

Изучение стока из лизиметров.

ХОССЕЙН СЕДГИ.

Данное исследование касается стока ненасыщенной гравитационной влаги в почве; оно было проведено в лизиметрах с голой почвой, слой которой имел 50, 100 и 150 см. глубины; применялись также и «баки», подобные этим лизиметрам, но с меньшей поверхностью, защищенные от атмосферических осадков и искуственно снабжавшиеся влагой.

Форма полученных гидрограмм дренажа указывает на то, что в климатических условиях парижского района, насыщение подопытного суглинка наблюдается только в исключительных случаях; отмеченный максимальный расход представлял 3 — 4 мм в час. Скорость переноса была значительно большей в глубоких лизиметрах, чем в мелких. Скорость эта в значительной мере зависит от исходной влажности, так-что разница в поведении между глубокими (150 см) и мелкими (50 см) лизиметрами зависит от давности последних выпавших осадков. Нужно однако отметить, что найденные скорости переноса, — того-же порядка что и скорости измеренные Феодоровым в поле с помощью тенсиометров размещенных на разных глубинах; можно, значит, предполагать что результаты полученные в лизиметрах приложимы и в полевых условиях.

От 85-ти, до 95-ти % влаги дренируются очень быстро, остаток эвакуируется более медленно, тем более медленно, чем глубже проникаемый слой почвы; так, уже через 2 — 4 дня после дождя, достаточно сильного чтобы общий дренаж превысил 5 мм, ежедневный дренаж не превышает 1/2 мм, а еще через 2 — 4 дня он становится совсем ничтожным в лизиметрах с глубиной в 50 см (сперва меньше 0,15 мм в сутки, затем почти полное, или полное отсутствие дренажа). И напротив, фаза эта длится десяток дней в лизиметрах с глубиной в 100 см, и еще дольше в лизиметрах с глубиной в 150 см. Чтобы полностью осветить значение дренажей не превышающих 1/2 мм в сутки, необходимо указать что они составляют приблизительно 1/10 общего годового дренажа в лизиметрах с глубиной в 50 см.

И, наконец, в случае «баков», изменения температуры могут вызвать дневные колебания расхода в конце стекания, повидимому из-за изменений поверхностного натяжения влаги.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bastisse E. -M., Hénin S., 1955. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. *Ann. agron.*, 203-232.

Féodoroff A., 1970. Une méthode pour l'étude de l'infiltration au champ. Comm. au *Symposium International sur l'Érosion* et *Science du Sol*, **1**, 19-30.

MOHSENEIAN M. R., 1966. *Effet du paillage sur l'économie de l'eau d'un sol dépourvu de végétation.* Thèse 3e cycle, Paris.

PENMAN H. L., SCHOFIELD R. K., 1941. Drainage and evaporation from fallow soil at Rothamsted *J. agric. Sci.*, **31**, 78.

*Ouvrages consultés*

BASTISSE E. -M., 1951. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie (premier mémoire). *Ann. agron.*, 722-781.

BOUASSE A., 1924. *Capillarité, phénomènes superficiels.* Delagrave, Paris.

CASTANY G., 1964. Courbe de tarissement et calcul des réserves régulatrices. *A. I. H. S.*, **65**.

CASTANY G., 1967. *Traité pratique des eaux souterraines.* Dunod, Paris.

CHAUVETEAU G., THIRRIOT Cl., 1967. Régimes d'écoulement en milieu poreux et limite de la loi de Darcy. *La Houille Blanche*, **2**.

COURAU M., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans les milieux poreux artificiels. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

DILEK R., 1969. *Étude du problème du drainage d'une monocouche et d'une bicouche par gammamétrie.* Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux.

FÉODOROFF A., 1962. Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. *Ann. agron.*, **13** (6), 523-547.

FÉODOROFF A., 1965 *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante.* Thèse Paris.

FÉODOROFF A., 1969. Infiltration et problèmes agronomiques, quelques approches expérimentales. *La Houille Blanche*, **8**.

FÉODOROFF A., BALLIF J. L., 1969. Étude de l'infiltration de la pluie *in situ* à l'aide de tensiomètres. *Ann. agron.*, **20** (5), 475-504.

FORKASIEWICZ J., POLAC H., 1967. Régime de tarissement de la Faux-de-la-Vis (Gard). *La Houille Blanche*, **1**.

HABIB P., SOEIRO F., 1957. Les mouvements de l'eau dans les sols sous l'influence de la température. *C. G. B. T. P.*

HENENSAL P., 1969. Études expérimentales de l'effet de lisid dans une chaussée. *Labor. Central des Ponts-et-Chaussées.*

HENENSAL P., 1965. Le lysimètre L. C. P. C. Fonction de la couche drainante de la chaussée. *Labor. central des Ponts-et-Chaussées.*

HÉNIN S. et coll., 1969. *Profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques.* Masson et Cie. 2e *édition*, Paris.

PUECH J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

PUECH J., 1969. Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'interprétation des débits. *Ann. agron.*, **20** (5), 505-516.

RÉMÉNIÉRAS G., 1965. *L'hydrologie de l'ingénieur*, Eyrolles, Paris.

ROCHE M., 1963. *Hydrologie de surface.* O. R. S. T. O. M., Gauthier-Villars, Paris.

RODE A. A., 1966. The nature of the minimal water retentive capacity. *Coll. UNESCO*, Wageningen.

SCHNEEBELI G., 1966. *Hydraulique souterraine.* Eyrolles, Paris.

SMITH W. O., 1966. Infiltration in sands and its relation to groundwater recharge. *Coll. UNESCO*, Wageningen.

SOEIRO F., 1964. Contribution à l'étude du mouvement de l'humidité dans les milieux poreux isothermes. *Cahier de la Recherche I. T. B. T. P.*, **18**.

TURC L., 1953. *Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement.* Thèse Paris.

VACHAUD G., 1968. Étude de régime transitaire de l'écoulement de l'eau pendant le drainage des nappes à surface libre. *La Houille Blanche*, **5**.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (1), 77-100.

# ÉTUDE DE DIFFÉRENTS FACTEURS INFLUENÇANT LA MANIFESTATION DE L'EFFET SPÉCIFIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR LES VÉGÉTAUX

F. LEMAIRE

avec la collaboration technique de Claude Lo

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

Cette étude a été conduite sur des cultures de Ray-grass en vases de végétation avec des matières organiques obtenues par décomposition d'une paille de blé dans des conditions contrôlées.

Les facteurs étudiés ont une importance inégale dans la mise en évidence de l'effet spécifique de la matière organique :

— ceux relatifs à la plante-test, comme le numéro d'ordre de la coupe et l'importance des rendements, n'ont pas d'action ;

— l'alimentation hydrique n'intervient pas dans les conditions de la technique de culture ;

— l'alimentation minérale joue un rôle important. La matière organique a un effet d'« engrais » qui peut être neutralisé soit en se mettant à l'optimum de l'alimentation minérale au moyen d'une courbe de réponse, soit en utilisant une matière organique obtenue par décomposition d'une paille déminéralisée. Ainsi l'effet spécifique apparaît seul ;

— le degré de décomposition de la matière organique employée intervient dans la manifestation de l'effet spécifique ;

— les quantités de matière organique présente dans le milieu jouent sur l'intensité de l'effet spécifique alors que le temps de contact avec le sol est sans action.

## INTRODUCTION

La matière organique joue un rôle important dans la fertilité : indirectement en modifiant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol ; directement en agissant sur la croissance des plantes. Cette action spécifique, bien mise en évidence par CHAMINADE (1952), FLAIG (1958), CHRISTEWA (1958), est caractérisée à la fois

par une augmentation des rendements et par une meilleure « utilisation » des éléments nutritifs. La matière organique des sols contient des éléments (N, P, K,... etc) qui après minéralisation sont utilisables par la plante ; des précautions spéciales doivent donc être prises pour mettre en évidence l'action spécifique qui se rapporte évidemment à la seule nature organique.

La manifestation et l'intensité de l'effet spécifique sont sous la dépendance de nombreux facteurs : d'une part forme et dose de la matière organique, et d'autre part conditions d'alimentation minérale, facteurs climatiques, espèce végétale, etc.

## I. — DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

Pour la mise en évidence de l'effet spécifique de la matière organique, les auteurs ont utilisé des végétaux, des sols, des techniques de cultures, des substances organiques variées, dans des conditions d'alimentation minérale et de climat différentes.

### 1. — *Plantes-test utilisées*

a) *Nature botanique du végétal :*

Des organismes inférieurs :

— champignons : *Aspergillus niger* (CHAMINADE 1954) ;

— algues :

+ des dinoflagellés marins du genre *Gonyaulax* (PRAKASH et RACHID, 1968) ;

+ *Scenedesmus quadricanda* (TICHY et NECHUTOVA, 1967).

Des plantes supérieures : CHRISTEWA (1951) a classé les plantes supérieures d'après l'intensité de leur réaction à la matière organique :

— groupe à réaction forte : pomme de terre, tomate, betterave sucrière ;

— groupe à réaction moyenne : les graminées ;

— groupe à réaction faible : les légumineuses.

b) *Stade de développement de la plante-test :*

— graines en voie de germination : TICHY et CHALUPOVA-JANOVICOVA (1958), MIROSLAVA SMIDOVA (1962), FIALOVA (1969) ;

— plantes en cours de croissance : FLAIG (1955-1965), SAALBACH (1957), TICHY (1958), SLADKY et TICHY (1959), SLADKY (1962), CHRISTEWA (1953), CHAMINADE (1956), BLANCHET (1958), LEMAIRE (1967) ;

— cycle complet de végétation : CHRISTEWA (1968).

Quels que soient la nature et le stade de développement de la plante-test, l'effet spécifique peut être mis en évidence.

### 2. — *Nature du sol*

KUTE *et al.* (1967) ont montré que la présence de paille humifiée dans trois sols ayant des propriétés différentes (pH variant de 4,7 à 8,2 ; degré de saturation du complexe absorbant allant de 61 à 100 p. 100) exerçait toujours une stimulation de la croissance du ray-grass.

D'une façon générale, les sols utilisés pour mettre en évidence l'effet spécifique sont très différents : chernozem, sols bruns calcaires, sols bruns lessivés, etc.

### 3. — *Techniques de culture*

a) *Cultures en solutions nutritives :* GUMINSKI, 1950 ; CHRISTEWA, 1951 ; CHAMINADE, 1968.

b) *Cultures sur sol en pots :* FLAIG et SAALBACH, 1956 ; BOISCHOT et SIMON, 1958.

c) *Essais au champ :* BARBIER et BOISCHOT, 1954 ; MULLER, 1966 ; NIKLEWSKI *et al.*, 1967 ; WENGLIGOWSKA-NIEDZWIECKA, 1967.

L'effet spécifique peut être obtenu avec ces diverses techniques de culture.

### 4. — *Alimentation minérale des plantes*

La plupart des auteurs précédemment cités se sont placés dans des conditions de bonne alimentation minérale. Par contre, GUMINSKI (1967) considère que l'effet spécifique apparaîtrait seulement dans des conditions de mauvaise alimentation. Ce point de désaccord indique l'importance des conditions de l'alimentation minérale dans la mise en évidence de l'effet spécifique.

### 5. — *Substances employées*

La nature et la concentration des substances sont variables suivant les auteurs.

a) *Nature des substances.*

- Substances naturelles complexes :
  - paille fermentée (CHAMINADE, 1963 *b* ; BOISCHOT et SIMON, 1958 ; KONONOVA, 1966 ; LEMAIRE, 1967) ;
  - sciure de bois compostée (DAVEY, 1953) ;
- Extraits conventionnels de ces substances naturelles, comme les acides humiques, fulviques et hymatomélaniques (NIKLEWSKI, 1931 ; CHAMINADE et BLANCHET, 1951 ; CHRISTEWA, 1951, 1953 ; PRATT, 1960 ; TICHY, 1966 ; GUMINSKI et SULEJ, 1967 ; FLAIG, 1968 ; HERNANDO FERNANDEZ, 1968 ; SIENKO et SZCZYPEK 1969) ;
- Substances-modèles :
  - vitamines : $B_1$ (SANDOZ, 1945) ;
  - hormones : acide $\beta$-indolacétique (HAMENCE, 1948) ;
  - quinones : thymohydroquinone (FLAIG et SAALBACH, 1956) ;
  - acides phénols : HENNEQUIN et JUSTE, 1967).

Les trois premiers groupes de substances modèles ont montré un effet analogue à celui des matières organiques présentées aux précédents paragraphes ; par contre, les acides phénols ont tendance à produire un effet dépressif.

b) *Concentrations utilisées.*

Les apports de substances naturelles complexes sont effectués de façon à obtenir un taux de 1 à 2 p. 100 de matière organique dans le milieu lorsqu'il s'agit de sol.

Les extraits conventionnels montrent une activité maximum pour des concentrations de l'ordre de 1 à 2,5 mg/l de solution.

Quant aux substances-modèles, les concentrations les plus actives sont de l'ordre de 1 mg/l.

Ces études ont souligné l'importance de la nature et de la concentration des substances utilisées sur la manifestation de l'effet spécifique.

### 6. — *Les conditions externes de croissance*

L'incidence des facteurs température, humidité de l'air, radiation globale sur l'effet spécifique a été peu étudiée. SÖCHTIG (1964) effectuant un essai en cellule climatique a montré que pour une durée du jour de 12 heures l'effet spécifique dû à la présence d'une substance modèle (thymohydroquinone) diminuait avec l'augmentation de l'intensité lumineuse.

CHRISTEWA (1968) fait état de l'action de conditions externes défavorables, plus particulièrement une température élevée, dans la mise en évidence de l'effet spécifique.

De façon plus générale, certains auteurs comme FLAIG (1965) pensent que l'effet spécifique ne se produirait que dans les zones de carence ou de toxicité des facteurs de croissance du végétal. Par contre, BLANCHET (1958) indique qu'il faut « que les principaux facteurs de croissance se trouvent au voisinage de l'optimum pour que se manifeste l'influence accélératrice de l'humus sur la nutrition et le métabolisme ». CHAMINADE est du même avis.

Cette étude bibliographique fait ressortir le caractère général et fondamental de l'effet spécifique de la matière organique. Certaines conditions de mise en évidence ont été très étudiées : nature des substances responsables, nature du végétal, alors que d'autres comme la dose ou le stade de décomposition des matières organiques, les conditions externes de croissance, l'alimentation minérale restent encore à préciser.

Ce mémoire a pour objet de rapporter un certain nombre d'observations sur les facteurs suivants : alimentations minérale et hyd rique, dose et degré de décomposition de la matière organique employée.

## II. — TECHNIQUES ET MATÉRIAUX UTILISÉS

### 1. — *Technique de culture et plante-test*

La culture est faite dans des pots en matière plastique de 100 cm² de section contenant un kilogramme de sol (CHAMINADE, 1960).

La matière organique est ajoutée à l'état frais au sol ; son humidité est déterminée au moment de l'incorporation de manière à exprimer les apports en matière organique sèche.

Les différents éléments nutritifs sont mélangés intimement au sol sous forme de sels ; sauf indications contraires, la fertilisation minérale suivante est apportée à un kilogramme de sol :

| | |
|---|---|
| 175 mg N | sous forme de $Ca(NO_3)_2$ |
| 1 000 mg $P_2O_5$ | sous forme de $KH_2PO_4$ |
| 1 000 mg $K_2O$ | sous forme de $KHCO_3$ et $KH_2PO_4$ |
| 100 mg S | sous forme de $MgSO_4, 7H_2O$ |
| 75 mg Mg | sous forme de $MgSO_4, 7H_2O$ |
| 250 mg Ca | sous forme de $Ca(NO_3)_2$ |
| 15 mg | oligo-éléments sous forme de nutramine |
| 120 mg N | par semaine sous forme de $NH_4NO_3$ |

L'alimentation en eau est assurée suivant les deux modalités décrites ci-dessous :

— arrosage journalier jusqu'à percolation : les fonds des pots sont percés de trous laissant couler le percolat dans une soucoupe en matière plastique ; avant chaque nouvel arrosage, le percolat précédent est versé sur le pot de manière à éviter des pertes d'éléments nutritifs, en particulier d'azote;

— arrosage journalier à poids constant : dans ce cas les quantités d'eau évapotranspirée sont connues et varient parallèlement à la formation de matière sèche (LEMAIRE, 1968).

Ces essais ont été conduits avec le ray-grass hybride var. *Io* semé à une densité de 1 000 graines par pot.

Les parties aériennes des plantes sont coupées 25 jours après la levée pour la première coupe, après 21 jours de croissance pour les deuxième et troisième coupes.

Chaque essai comprend quatre répétitions de chaque traitement.

Les caractéristiques du sol utilisé (horizon B d'un sol brun lessivé) sont les suivantes :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Argile | 12,0 p. 100 | Matières organiques totales | : 0,6 p. 100 |
| Limon | 24,5 p. 100 | N total | : 0,47 p. 1 000 |
| Sable fin | 52,0 p. 100 | $P_2O_5$ assimilable Dyer | : 0,015 p. 1 000 |
| Sable grossier | 7,7 p. 100 | $K_2O$ échangeable | : 0,145 p. 1 000 |
| pH (eau) | 6,5 | | |

### 2. — *Préparation de la matière organique*

Étant donné le but de ce travail, deux types de matière organique ont été mises en comparaison :

a) *Matière organique normale.*

De la paille de blé additionnée d'urée (5,2 g par kg paille sèche) est mise à fermenter dans des conditions définies de température (40°C) et d'humidité (75 p. 100 en poids). Chaque semaine, le produit est brassé de manière à l'aérer. Le processus de décomposition est suivi globalement dans le temps en notant chaque mois les quantités de matière sèche restante (fig. 1). Pendant les trois premiers mois, la perte de poids est très rapide et importante puisque 60 p. 100 de la matière sèche ont disparu ; le processus se ralentit ensuite. Ceci est conforme à la loi de HÉNIN et DUPUIS (1945) ; MAEDER (1960) a obtenu les mêmes résultats.

Au bout de 6 mois, un produit relativement stable est obtenu représentant 25 p. 100 de la matière sèche initiale. Ses caractéristiques chimiques sont données dans le tableau 4 ci-après.

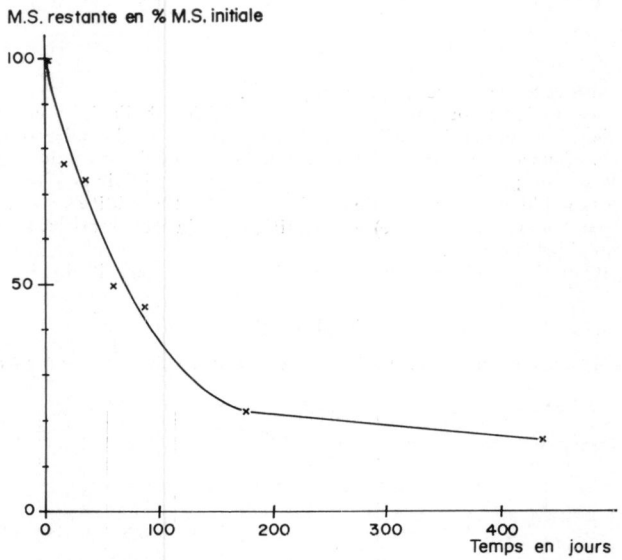



FIG. 1. — *Décomposition de la paille de blé en fonction du temps*

b) *Matière organique déminéralisée.*

Pour diminuer l'effet d' « engrais P et K » de la matière organique standard, une matière organique déminéralisée a été préparée en faisant fermenter une paille préalablement traitée pour en abaisser la teneur en éléments minéraux.

— Agent de déminéralisation utilisé : trois réactifs ont été essayés : l'eau bipermutée, l'acide acétique, et l'acide chlorhydrique.

TABLEAU 1

*Pouvoir de déminéralisation des trois réactifs après un contact de 24 heures*

| Réactif | Eau bipermutée | $HCH_3COO$ N | HCl N |
|---|---|---|---|
| P enlevé à la paille en % de P initial ..... | 37 | 60 | 88 |
| Matière sèche perdue en % MS initiale ..... | 0 | 2,3 | 30 |

L'acide acétique N a été retenu bien qu'il ne retire que 60 p. 100 du $P_2O_5$, car son action sur la partie organique est faible.

— Le tableau 2 montre qu'après 24 heures de contact, la déminéralisation n'augmente plus que faiblement.

TABLEAU 2

*Influence du temps de contact sur la déminéralisation de la paille par* $HCH_3COO$ N

| Temps de contact en heures | 0 | 24 | 90 | 168 |
|---|---|---|---|---|
| P % MS | 0,070 | 0,028 | 0,027 | 0,024 |

Le temps de contact de 24 heures a donc été utilisé.

— Mise en fermentation : après lavage jusqu'à disparition de l'acidité et séchage à l'étuve, la paille déminéralisée obtenue était stérile. Il fallait donc apporter les microorganismes présents avant le traitement. L'ensemencement a été réalisé de la façon suivante : de la paille fraîche non fermentée est lavée à l'eau ; le jus obtenu est laissé au contact de l'air pendant huit jours ; il est ensuite incorporé à la paille déminéralisée de manière à porter l'humidité à 75 p. 100. Après addition d'urée (5,2 g par 1 000 g paille sèche) les conditions de la fermentation sont les mêmes que pour la matière organique normale.

Les quantités de matière sèche restante en fonction du temps sont indiquées dans le tableau 3.

TABLEAU 3

*Matière sèche restante en p. 100 matière sèche initiale en fonction du temps en jours*

| Temps en jours | 0 | 35 | 63 | 92 | 127 | 143 | 207 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MS restante en % de la MS intiale | 100 | 92,5 | 77,4 | 71,4 | 62,9 | 61,1 | 59,2 |

Le processus est moins rapide que dans la matière organique normale puisqu'au bout de 6 mois, 60 p. 100 de la matière sèche initiale subsistent.

Le tableau 4 présente la composition chimique des produits obtenus par ces deux méthodes.

TABLEAU 4

*Compositions chimiques de la matière organique normale et de la matière organique déminéralisée après 6 mois de décomposition*

(en p. 100 MS)

| Éléments | N | P | K | C/N |
|---|---|---|---|---|
| Matière organique normale | 3,66 | 0,649 | 8,95 | 12 |
| Matière organique déminéralisée | 1,52 | 0,087 | 0,59 | 30 |

La matière organique déminéralisée est donc beaucoup plus pauvre que celle obtenue normalement puisqu'elle apporte six fois moins de P et seize fois moins de K. La comparaison de leurs effets doit donc permettre de mieux tenir compte des éléments minéraux apportés par la matière organique.

### 3. — *Évaluation de l'effet spécifique de la matière organique*

L'effet spécifique se traduit par une stimulation de la croissance et une augmentation du rendement. Dans le cas d'un essai isolé, la comparaison des résultats permet d'apprécier l'intensité de cet effet. Dans le cas où plusieurs essais ont été réalisés à des époques différentes, il est nécessaire de disposer d'une base de comparaison.

*a*) Augmentation du rendement en présence de matière organique en p. 100 du rendement du témoin. Soient R le rendement en présence de matière organique et $R_0$ le rendement du témoin dans les mêmes conditions d'alimentation et de facteurs externes, la différence $R - R_0$ mesure l'effet spécifique absolu. Or, celui-ci sera difficilement comparable avec celui obtenu dans un autre essai ou dans une autre coupe du même essai à cause de la variabilité des conditions externes. Pour éviter cet inconvénient la différence $R - R_0$ est transformée en valeur relative

$$\frac{R - R_0}{R_0} \times 100$$

*b*) en l'absence d'effet spécifique les valeurs R et $R_0$ sont voisines, les points vont se placer sur la bissectrice.

Si les valeurs R et $R_0$ sont différentes, deux cas peuvent se présenter :

$R < R_0$ les points se trouvent en dessous de la bissectrice ; l'effet est dépressif ;

$R > R_0$ les points sont situés au-dessus de la bissectrice ; l'effet est stimulant.

Si l'effet est linéaire dans l'intervalle de variation observé pour $R_0$, l'équation de la droite de régression pourra être :

— soit du type $R = bR_0$ avec $b > 1$ dans le cas d'un effet stimulant. L'effet spécifique en valeur absolue $\Delta R = (b - 1)R_0$ sera proportionnel au rendement $R_0$ alors qu'en valeur relative il sera constant et égal à $\frac{\Delta R}{R_0} = b - 1$

— soit du type $R = a + bR_0$

- si $b = 1$, l'effet en valeur absolue sera indépendant de $R_0$ et égal à $\Delta R = a$, alors qu'en valeur relative, il sera décroissant avec l'augmentation de Ro $\left(\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{a}{R_0}\right)$ ;
- si $b > 1$, l'effet en valeur absolue sera croissant avec $R_0$ et égal à $\Delta R = a + (b - 1)R_0$ alors qu'en valeur relative $\frac{\Delta R}{R_0} = b - 1 + \frac{a}{R_0}$ il sera décroissant ;
- si $b < 1$, l'effet en valeur absolue et en valeur relative sera décroissant avec l'augmentation de $R_0$ : $\Delta R = a + (b - 1)R_0$ avec $(b - 1)$ négatif, $\frac{\Delta R}{R_0} = (b - 1) + \frac{a}{R_0}$.

TABLEAU 5

*Rendements du témoin et du traitement 2 p. 100 matière organique, pour trois coupes successives (en g MS par pot)*

| | Répétition | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | Moy. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1re coupe | Témoin. . . . . | 10,87 | 9,50 | 7,38 | 8,85 | 7,57 | 6,66 | 9,45 | 5,17 | 7,79 | 13,20 | 8,64 |
| | Matière organique 2 % | 12,10 | 11,17 | 8,49 | 9,83 | 8,01 | 6,55 | 10,85 | 5,35 | 7,63 | 13,70 | 9,36 |
| | $\frac{R - Ro}{Ro} \times 100$. . . . . | 11,3 | 17,5 | 15,0 | 11,0 | 5,8 | — 1,6 | 14,8 | 3,5 | — 2,0 | 3,7 | 7,9 |
| 2e coupe | Témoin. . . . . | 6,70 | 6,97 | 5,58 | 7,38 | 5,74 | 6,05 | 6,54 | 8,38 | 8,16 | 7,61 | 6,91 |
| | Matière organique 2 % | 7,40 | 7,75 | 5,86 | 7,49 | 5,98 | 6,91 | 6,37 | 9,33 | 8,64 | 8,46 | 7,41 |
| | $\frac{R - Ro}{Ro} \times 100$. . . . . | 10,4 | 11,1 | 5,0 | 1,4 | 4,1 | 14,2 | — 2,6 | 11,3 | 5,8 | 11,1 | 7,1 |
| 3e coupe | Témoin. . . . . | 6,82 | 5,47 | 5,54 | 5,90 | 3,88 | 5,90 | 6,06 | 6,78 | 7,78 | 3,36 | 5,74 |
| | Matière organique 2 % | 7,32 | 6,17 | 6,13 | 5,79 | 4,60 | 7,49 | 6,1 | 8,88 | 8,80 | 4,16 | 6,55 |
| | $\frac{R - Ro}{Ro} \times 100$. . . . . | 7,3 | 12,8 | 10,6 | — 1,4 | 18,5 | 26,9 | 2,4 | 30,9 | 13,1 | 23,6 | 14,4 |

Une analyse de variance permettra de voir si la régression est significative. Si tel est le cas, il faudra alors tester la valeur du coefficient angulaire *b* par rapport à 1 et la constante *a* par rapport à 0 pour choisir entre les hypothèses précédentes. Pour tester la constante ***a***, nous avons utilisé la méthode de MATHER (1965) qui consiste à vérifier si la ligne de régression peut passer par l'origine (point 0 — 0). Dans le cas où la ligne de régression ne passerait pas par l'origine, cela indiquerait que le phénomène n'est pas linéaire dans l'intervalle de variation compris entre 0 et le début de l'intervalle observé.

#### 4. — *Influence du numéro d'ordre de la coupe*

Le ray-grass hybride var. *Io* choisi comme plante-test se trouve être une plante à réaction moyenne vis-à-vis de la matière organique. Cette plante présente certains avantages : facilité de culture, nombre élevé de plantes par pot permettant de limiter la part de la variation génétique, possibilité d'effectuer plusieurs coupes.

Les essais réalisés sont limités à trois coupes.

L'effet spécifique se manifeste-t-il avec la même intensité sur chacune d'elles ? Avant la première coupe, la plante s'installe dans le milieu de culture en fabriquant à la fois ses systèmes racinaire et aérien et en utilisant les réserves de la graine, alors que pour les coupes suivantes, le végétal rétablit son système aérien, augmente son système racinaire et utilise les réserves accumulées dans les collets de la récolte précédente. D'autre part, le végétal vieillit et a tendance à s'épuiser. Les phénomènes physiologiques sont différents entre la première coupe et les suivantes.

Pour connaître cette influence, on a comparé les résultats de dix essais réalisés à des périodes différentes dans des conditions identiques d'alimentations minérale et hydrique, de nature et de quantité de matière organique (tabl. 5).

Une analyse de variance a montré que les rendements moyens des trois coupes du témoin sont différents : les rendements en première coupe sont supérieurs à ceux de la deuxième coupe au seuil 5 p. 100 et à ceux de la troisième coupe au seuil 1 p. 100, les rendements des deuxième et troisième récoltes ne sont pas statistiquement différents les uns des autres. Par contre, les augmentations moyennes de rendement dues à la présence de matière organique ne sont pas statistiquement différentes.

Bien que les rendements des trois coupes soient assez différents, l'effet spécifique peut se manifester avec des intensités du même ordre pour n'importe laquelle d'entre elles.

## III. — FACTEURS ÉTUDIÉS

### 1. — *Alimentation minérale des plantes*

L'évaluation de l'effet spécifique implique la nécessité de neutraliser l'action d' « engrais » de la matière organique pour faire apparaître l'effet propre de celle-ci.

a) *Action d'engrais de la matière organique normale.*

Pour se rendre compte de son importance, deux essais ont été effectués de la manière suivante : deux séries de pots sont préparés en apportant tous les éléments minéraux moins un (N ou P) ; l'apport de l'élément manquant est réalisé par des doses croissantes soit sous forme minérale soit sous forme de matière organique.

— La matière organique normale comme engrais azoté : les résultats obtenus lors de la première coupe sont donnés dans le tableau 6.

La fourniture d'azote par la matière organique est faible pendant la durée de la culture (un mois) puisque la dose la plus forte (4 p. 100) de matière organique donne un rendement en matière sèche voisin de celui obtenu avec des apports de 131 mg d'azote minéral.

— La matière organique normale comme engrais phosphaté : les résultats de la première coupe sont donnés dans le tableau 7.

La dose la plus forte de matière organique (4 p. 100) fournit environ 70 mg de $P_2O_5$ puisque le rendement (5,14 g) se situe entre ceux obtenus avec 50 et 100 mg $P_2O_5$ minéral. Dans ce cas, la fourniture de $P_2O_5$ par la matière organique apparaît importante si on observe que le maximum de rendement est obtenu avec 200 mg $P_2O_5$ minéral ; dans d'autres essais elle apparaît plus forte ou plus faible.

TABLEAU 6

*Comparaison des réponses obtenues avec des apports variables d'azote minéral ou de matière organique normale*

| Apport d'azote sous forme minérale en mg/pot ..... | 0 | 65,5 | 131,0 | 196,5 | 262,0 | 327,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Rdt g MS/pot..... | 0,50 | 1,43 | 2,27 | 3,41 | 3,87 | 5,75 |
| Apport d'azote par différentes doses de MO en mg/pot ..... | 0 | 187 | 375 | 750 | 1 125 | 1 500 |
| Rdt g MS/pot..... | 0,50 | 0,64 | 0,77 | 1,18 | 1,59 | 2,12 |

TABLEAU 7

*Comparaison des réponses obtenues avec des apports variables de phosphore minéral ou de matière organique normale*

| Apport de $P_2O_5$ sous forme minérale en mg/pot ... | 0 | 50 | 100 | 200 | 400 | 500 | 1 000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rdt g MS/pot..... | 2,62 | 4,52 | 6,66 | 7,99 | 7,91 | 7,83 | 7,96 |
| Apport de $P_2O_5$ par différentes doses de MO en mg/pot ..... | 0 | 37,2 | 74,5 | 149 | 298 | 447 | 596 |
| Rdt g MS/pot..... | 2,62 | 2,60 | 2,83 | 3,21 | 3,89 | 4,70 | 5,14 |

b) *Action spécifique de la matière organique normale.*

L'action d' « engrais » de la matière organique peut être neutralisée par l'apport de quantités d'éléments minéraux suffisants dans le milieu. Des courbes de réponse du végétal à l'alimentation N ou P sont obtenues en apportant des quantités croissantes d'un seul élément en présence ou non de matière organique normale, les autres facteurs de croissance étant maintenus non limitants. Deux cas sont à considérer : celui de l'alimentation N et celui de l'alimentation P.

— Mise en évidence au moyen de courbes de réponse à l'alimentation N. L'essai comprenait six doses de N nitrique (0 à 300 mg/semaine) sous forme de nitrate de calcium, apportées à deux séries de pots : une série témoin, une série avec de la matière organique normale à la dose de 2 p. 100.

La figure 2 montre l'évolution des rendements pour les deux séries de pots. L'effet spécifique apparaît puisque les rendements sont augmentés par la présence de matière organique normale. Comme l'a déjà montré CHAMINADE (1958), l'optimum

de nutrition N est déplacé vers la zone de toxicité en présence de matière organique : dans le témoin, le début de l'optimum se trouve à 120 mg/semaine alors que dans le traitement matière organique, il se situe à 180 mg/semaine. Cela n'est pas dû à l'azote de la matière organique puisqu'une quantité supplémentaire d'azote minéral n'augmente plus le rendement du témoin.

L'effet apparent d' « engrais N » de la matière organique est faible. Il n'est pas nécessaire de se mettre à l'optimum de la nutrition azotée pour voir se manifester l'effet spécifique.

— Mise en évidence au moyen de courbes de réponse à l'alimentation phosphatée. Le même type d'essai a été réalisé en faisant varier la quantité de $P_2O_5$ apportée (0 à 1762 mg/pot) en présence ou non de matière organique normale à la dose de 2 p. 100, les autres facteurs de croissance étant maintenus à un niveau non limitant. La figure 3 montre les rendements obtenus. La présence de matière organique élève le rendement maximum par rapport au témoin. Un effet spécifique est donc mis en évidence.

L'apport de matière organique suffit presque à lui seul pour atteindre le rendement maximum du témoin ; l'effet du P de la matière organique est important dans ce cas. Il est donc nécessaire de se mettre à l'optimum de la nutrition phosphatée pour isoler l'effet spécifique de la matière organique.

Pour diminuer l'effet du phosphore de la matière organique, une courbe de réponse au P minéral est obtenue en présence ou non de matière organique déminéralisée à la dose de 1 p. 100.

Les résultats sont donnés dans le tableau 8.

TABLEAU 8

*Rendements obtenus avec ou sans matière organique déminéralisée en fonction des quantités de $P_2O_5$ apportées dans le pot*

| $P_2O_5$ mg/pot ..... | 0 | 50 | 100 | 200 | 400 | 500 | 1 000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rdt témoin g MS/pot ... | 2,62 | 4,52 | 6,66 | 7,99 | 7,91 | 7,83 | 7,96 |
| Rdt avec 1 % MO déminéralisée g MS/pot..... | 3,53 | 6,49 | 7,77 | 8,09 | 8,83 | 8,71 | 9,00 |

Le plafond des rendements est plus élevé en présence de matière organique déminéralisée ; les faibles apports de P marquent en présence de cette matière organique. L'utilisation d'une telle matière organique déminéralisée permet de mettre en évidence l'effet spécifique dans toute la courbe de réponse au phosphore (LEMAIRE, 1967).

A cause du cumul de l'effet d' « engrais » et de l'effet spécifique de la matière organique normale dans la zone des faibles apports de phosphore minéral, il faut nécessairement se mettre à l'optimum de l'alimentation phosphatée pour obtenir l'effet spécifique seul.

c) *Conclusions.*

Les conditions de l'alimentation minérale des plantes sont très importantes pour la mise en évidence de l'effet spécifique de la matière organique. L'effet d' « engrais P » de la matière organique est plus fort que celui d' « engrais N ».

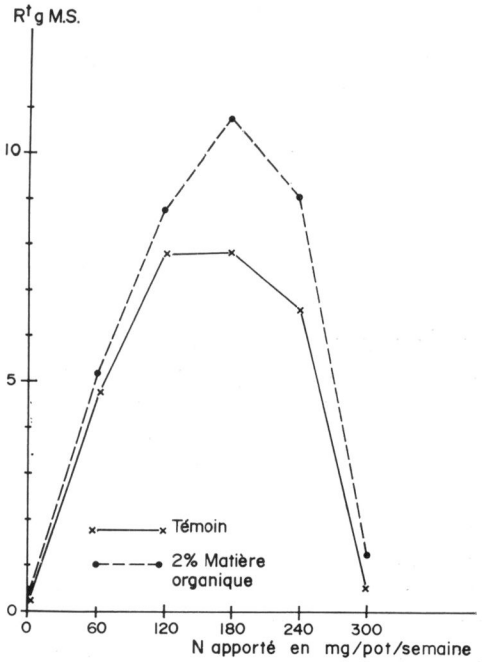



FIG. 2. — *Rendements en fonction de l'alimentation azotée en présence ou non de matière organique*

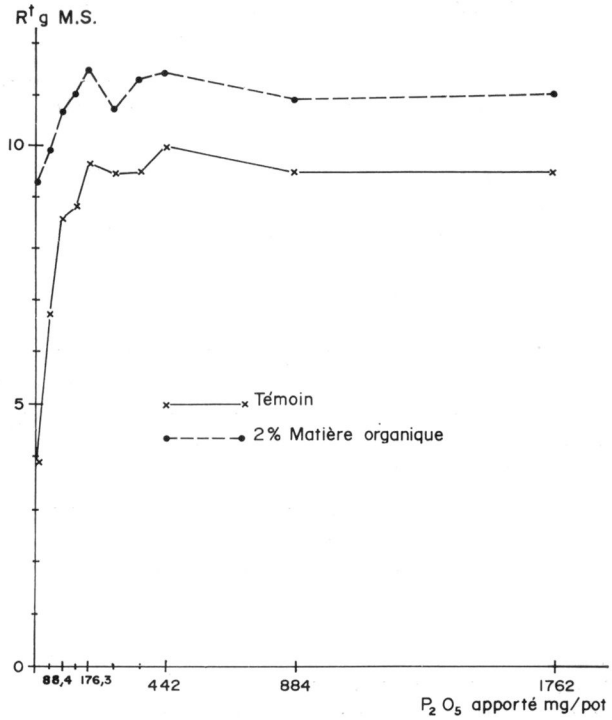



FIG. 3. — *Rendements en fonction de l'alimentation phosphatée en présence ou non de matière organique*

Comme il est plus facile de se placer à l'optimum de l'alimentation phosphatée qu'à celui de l'alimentation azotée, la mise en évidence de l'effet spécifique seul est réalisée avec une courbe de réponse à l'alimentation azotée.

### 2. — *Alimentation hydrique des plantes*

L'apport de matière organique au milieu de culture modifie la capacité de rétention pour l'eau. On peut supposer que l'augmentation de rendement liée à la présence de matière organique provient d'une amélioration dans l'alimentation hydrique des plantes.

Pour vérifier ce point, un essai a été réalisé sur le même sol de limon dont la capacité de rétention est rendue variable par des apports croissants d'amiante cardée ou de matière organique normale, les conditions de l'alimentation minérale étant voisines de l'optimum (tabl. 9).

TABLEAU 9

*Capacités de rétention du milieu en g eau pour 1 000 g sol et rendement en g MS/pot en fonction des quantités d'amiante ou de matière organique normale sèche ajoutées*

| Quantité d'amiante en g/1 000 g sol | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Quantité d'eau retenue en g/ 1 000 g sol | 371 | 422 | 435 | 442 | 446 | 464 |
| Rdt g/MS/pot | 5,30 | 5,04 | 5,03 | 4,77 | 4,73 | 4,95 |
| Quantité de MOS en g par 1 000 g sol | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| Quantité d'eau retenue en g/ 1 000 g sol | 371 | 395 | 448 | 504 | 580 | 602 |
| Rdt g MS/pot | 5,30 | 5,35 | 5,70 | 5,86 | 5,90 | 6,59 |

La modification de la capacité de rétention par l'amiante est sans action sur le rendement. Il faut remarquer que l'alimentation hydrique était réalisée par des arrosages journaliers jusqu'à percolation ; cette manière d'opérer limite les effets d'une capacité de rétention variable car la quantité d'eau mise à la disposition de la plante est toujours suffisante.

L'effet de la matière organique ne s'explique pas par les modifications de la capacité de rétention en eau du milieu dans les conditions de la technique de culture utilisée.

### 3. — *Facteurs liés à la matière organique*

Parmi les facteurs dépendant de la matière organique, trois ont été étudiés : la quantité de matière organique présente dans le milieu, le degré de décomposition et le temps de contact de la matière organique avec le sol.

a) *Quantité de matière organique normale présente dans le milieu.*

— Des essais répétés pendant plusieurs années ont été effectués dans les mêmes conditions d'alimentations minérale et hydrique à l'optimum, avec six doses de matière organique normale.

Les résultats sont donnés dans le tableau 10.

TABLEAU 10

*Rendements obtenus avec différentes doses de matière organique (g MS par pot)*

| | | Dose | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numéro de la coupe | N° essai | 0,0 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 10,87 | 11,82 | 11,83 | 12,10 | 12,56 | 12,94 |
| | 2 | 9,50 | 9,29 | 10,26 | 11,17 | 11,28 | 11,26 |
| | 3 | 7,38 | 8,04 | 8,30 | 8,49 | 8,49 | 8,72 |
| | 4 | 8,85 | 9,54 | 9,77 | 9,83 | 10,46 | 10,56 |
| | 5 | 7,57 | 7,68 | 8,08 | 8,01 | 8,65 | 8,24 |
| | 6 | 6,66 | 8,03 | 7,70 | 6,55 | 6,72 | 6,10 |
| | Moy. | 8,47 | 9,06 | 9,32 | 9,35 | 9,69 | 9,63 |
| 2 | 1 | 6,70 | 6,68 | 6,81 | 7,40 | 7,30 | 7,44 |
| | 2 | 6,97 | 6,91 | 7,07 | 7,75 | 7,76 | 7,90 |
| | 3 | 5,58 | 5,35 | 5,70 | 5,86 | 5,90 | 6,59 |
| | 4 | 7,38 | 7,39 | 7,70 | 7,49 | 7,79 | 7,93 |
| | 5 | 5,74 | 6,07 | 6,08 | 5,98 | 6,05 | 6,17 |
| | 6 | 6,05 | 7,28 | 7,57 | 6,91 | 7,57 | 7,43 |
| | Moy. | 6,40 | 6,61 | 6,82 | 6,89 | 7,06 | 7,24 |
| 3 | 1 | 6,82 | 6,73 | 6,76 | 7,32 | 7,27 | 7,34 |
| | 2 | 5,47 | 5,70 | 6,01 | 6,17 | 6,16 | 6,30 |
| | 3 | 5,54 | 5,33 | 6,00 | 6,13 | 6,17 | 6,25 |
| | 4 | 5,90 | 5,69 | 6,05 | 5,79 | 6,00 | 6,32 |
| | 5 | 3,88 | 4,12 | 4,03 | 4,60 | 4,45 | 4,22 |
| | 6 | 5,90 | 6,43 | 6,62 | 7,49 | 8,29 | 8,79 |
| | Moy. | 5,58 | 5,66 | 5,91 | 6,25 | 6,39 | 6,53 |

Les chiffres sont la moyenne de 4 répétitions.

Les rendements augmentent quand le taux de matière organique passe de 0 à 4 p. 100. De manière à apprécier la variation de l'effet spécifique avec le taux de matière organique, des coefficients de corrélation et des régressions ont été calculés entre le rendement R du traitement matière organique et le rendement $R_0$ du témoin pour chacune des doses expérimentées. Cette manière de procéder permet d'éliminer l'influence éventuelle des conditions climatiques variables pour les différents essais. Les coefficients de corrélation et les régressions calculés sont réunis dans le tableau 11.

TABLEAU II

*Coefficients de corrélation r et régressions calculés pour 5 doses de matière organique*

| MO % de sol | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| r | 0,96** | 0,95** | 0,95** | 0,95** | 0,95** |
| Équation régression | $R = 1{,}06\ R_o - 0{,}11$** | $R = 1{,}09\ R_o - 0{,}09$** | $R = 1{,}16\ R_o - 0{,}40$** | $R = 1{,}19\ R_o - 0{,}40$** | $R = 1{,}26\ R_o - 0{,}78$** |

** Significatif au seuil 1 p. 100.

Les coefficients angulaires 1,06 et 1,09 ne sont pas statistiquement différents de 1 alors que les trois autres le sont au seuil 5 p. 100. Compte tenu de la dispersion, il n'est pas possible de montrer si la droite de régression passe en dehors de l'origine.

L'effet spécifique mesuré par le coefficient angulaire de la droite de régression croît avec la dose de matière organique.

— L'effet spécifique croît-il indéfiniment avec le taux de matière organique présent dans le milieu ?

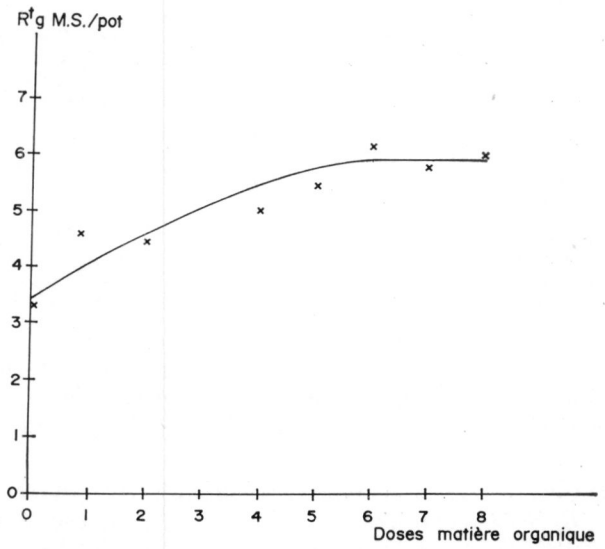



FIG. 4. — *Rendements en fonction des doses de matière organique dans le milieu*

L'essai suivant a été réalisé dans les mêmes conditions d'alimentation minérale avec des doses de matière organique allant de 0 à 8 p. 100. Les résultats sont donnés dans la figure 4.

L'effet spécifique augmente avec l'apport de matière organique jusqu'à la dose de 6 p. 100 puis il reste constant ; les augmentations relatives de rendement par rapport au témoin atteignent alors exceptionnellement 80 p. 100.

b) *Degré de décomposition de la matière organique.*

Au cours de la décomposition de la paille, certaines substances disparaissent (cas de la cellulose), d'autres se transforment (cas de la lignine), d'autres prennent naissance (polysaccharides, substances quinoniques) ; l'effet spécifique pourrait ne pas avoir lieu pour certains stades de décomposition ou apparaître avec des doses différentes pour des temps de décomposition variés. CHAMINADE (1963 *a*) a montré qu'au bout de 15 jours de fermentation, l'effet dépressif de la paille disparaissait et que l'effet spécifique allait croissant avec le temps de décomposition.

— Essai réalisé : de la paille décomposée pendant des temps variables (0 à 90 jours) suivant la technique décrite ci-dessus est ajoutée en quantités croissantes au milieu de culture (0 à 40 g/kg sol), les conditions des alimentations minérale et hydrique étant à l'optimum. La quantité d'urée ajoutée pour la décomposition de la paille à l'étuve a été incorporée dans le traitement recevant de la paille non décomposée.

Au cours du processus de décomposition de la paille, des pertes en matière sèche ont lieu (fig. 1). Les doses de paille décomposée pendant des temps variables sont exprimées en équivalent paille non décomposée.

Le tableau 12 donne l'exemple de la dose équivalente 10 g paille/kg sol.

TABLEAU 12

*Quantité de matière sèche à apporter pour réaliser la dose équivalente 10 g paille par kg sol en fonction du temps de décomposition*

| Temps de décomposition en jours | 0 | 15 | 30 | 60 | 90 |
|---|---|---|---|---|---|
| Quantité de MS en g/1 000 g sol | 10 | 7,64 | 7,36 | 4,98 | 4,50 |

En procédant de cette manière, les quantités totales d'éléments minéraux apportées par la paille étaient constantes pour chacune des doses employées, mais les quantités réelles de matière organique incorporée étaient variables pour un même taux d'équivalent paille.

— Résultats (fig. 5, 6, 7). Une analyse de variance des résultats a montré que les doses et les temps de décomposition avaient un effet hautement significatif sur les rendements.

+ En première coupe (fig. 5) :

- pour des temps de décomposition compris entre 0 et 30 jours, l'effet est dépressif et croît avec la dose de matière organique ;
- pour le temps de 60 jours, l'effet est nul ;

• pour le temps de 90 jours, l'effet a tendance à être stimulant pour les premières doses.

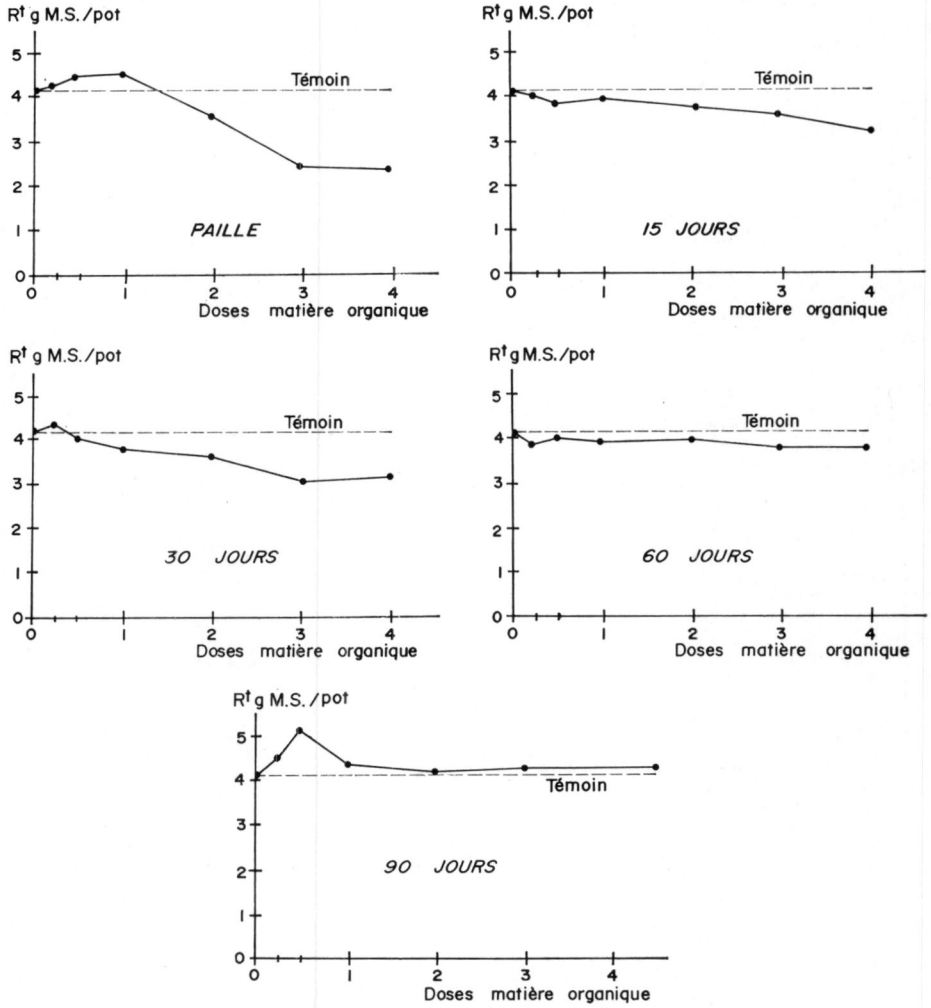



FIG. 5. — *Rendements de la première coupe en fonction des doses et des durées de décomposition de la paille*

+ En deuxième coupe (fig. 6) :
  • pour les temps compris entre 0 et 30 jours, l'effet est encore dépressif ;
  • pour le temps de 60 jours, l'effet est encore nul ;
  • pour le temps de 90 jours, l'effet est stimulant.
+ En troisième coupe (fig. 7) :
  • pour tous les temps de décomposition, l'effet est stimulant et croît avec la dose de matière organique.

— Interprétation : l'effet dépressif de la paille disparaît au bout de deux mois de décomposition en étuve. Il faut attendre trois mois pour obtenir des effets stimulants.

La nature des effets de la matière organique sur la croissance des végétaux est variable suivant le stade de décomposition de la paille : les effets d'abord dépressifs deviennent stimulants à partir de deux mois de décomposition. On peut expliquer cette variation par la coexistence de deux types d'action : l'une dépressive, l'autre

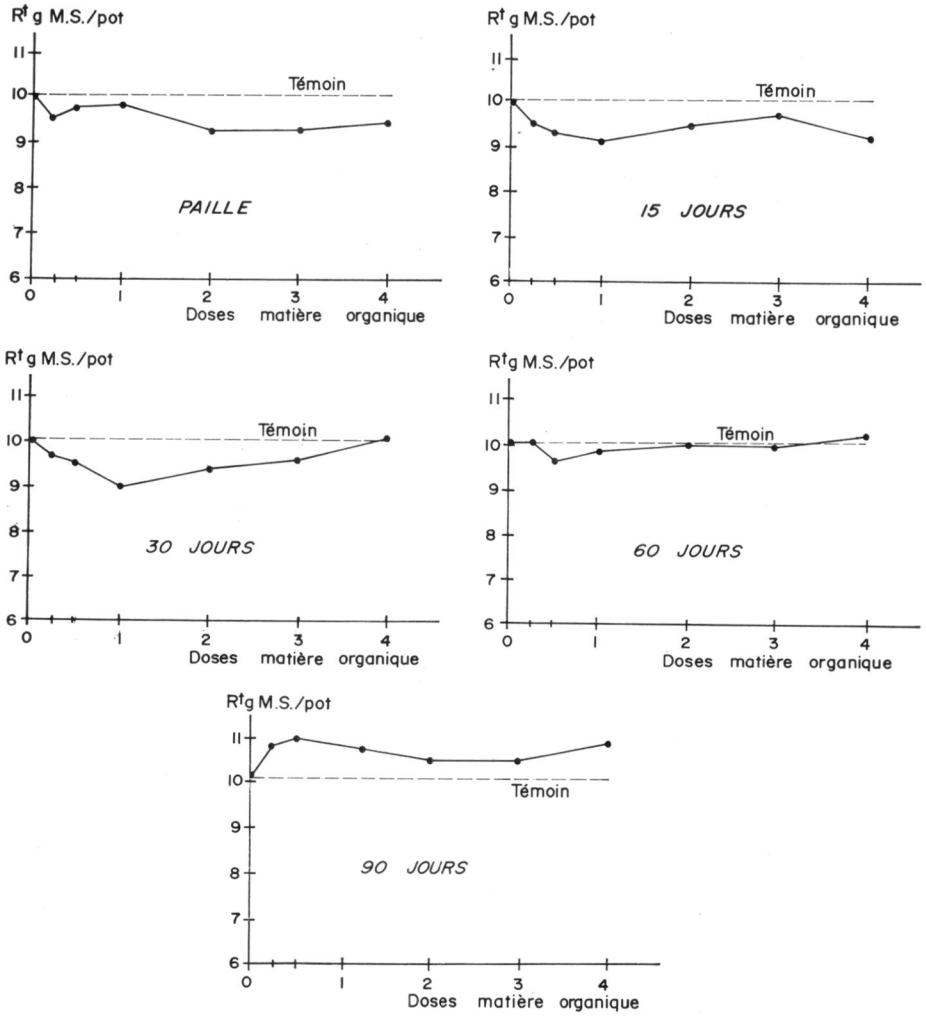



FIG. 6. — *Rendements de la deuxième coupe en fonction des doses et des durées de décomposition de la paille*

stimulante et c'est le rapport entre ces deux actions qui détermine la nature des effets. On peut aussi imaginer qu'au cours de la fermentation les substances à effet dépressif disparaissent ou se transforment en donnant naissance à des substances à effet stimulant.

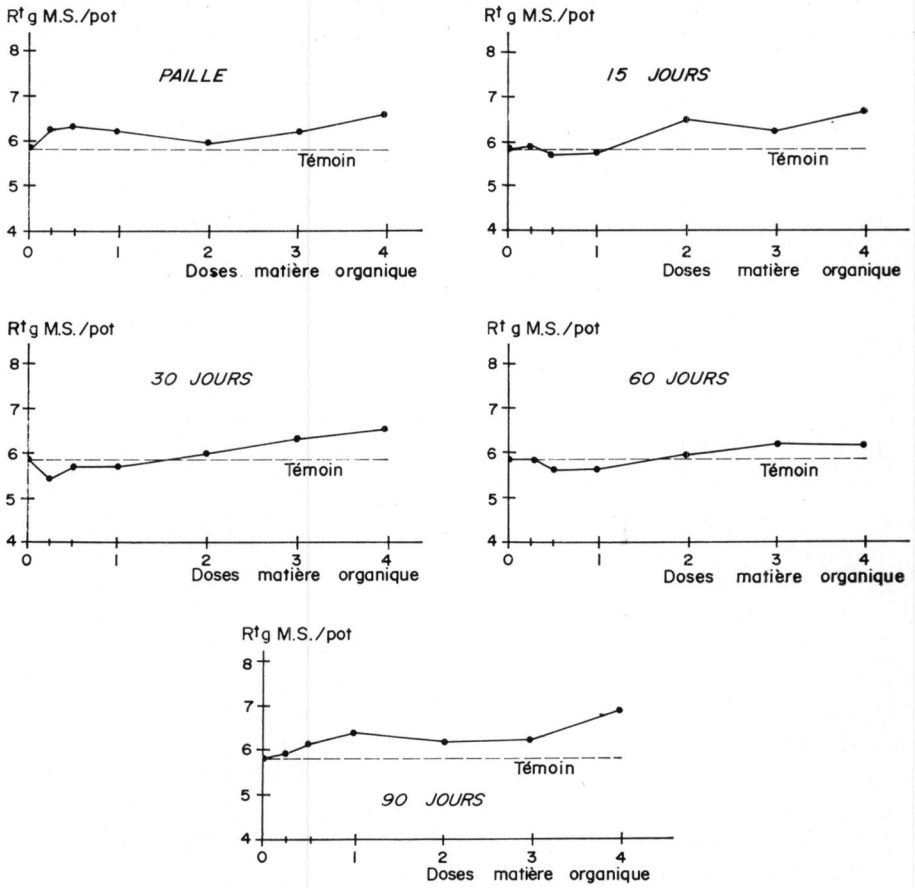



FIG. 7. — *Rendements de la troisième coupe en fonction des doses et des durées de décomposition de la paille*

c) *Temps de contact de la matière organique normale avec le sol.*

La matière organique employée dans les essais continue à évoluer après son incorporation au sol ; l'effet spécifique peut donc être variable avec le temps de contact de la matière organique et du sol. L'essai suivant a été réalisé :

Trois séries de pots sont préparées avec des doses croissantes (0 à 4 p. 100) de matière organique normale. La fertilisation minérale était apportée en quantité suffisante, c'est-à-dire correspondante aux effets maxima. Les semis ont été effectués à des dates échelonnées : le premier, dès l'incorporation de la matière organique ; le second, un mois après ; le troisième, deux mois après.

Les résultats sont donnés dans le tableau 13. L'effet spécifique est évalué par l'augmentation relative du rendement due à la présence de matière organique par rapport au rendement du témoin.

Le temps de contact matière organique-sol avant le semis n'intervient pas dans la mise en évidence de l'effet spécifique d'une paille décomposée pendant six mois.

TABLEAU 13

*Influence du temps de contact matière organique-sol avant le semis sur l'effet spécifique de la matière organique*

| Temps de contact matière organique-sol avant le semis en mois | 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|---|
| Effet spécifique obtenu avec 1 % matière organique normale | 8,8 | 8,0 | 12,4 |
| Effet spécifique obtenu avec 4 % matière organique normale | 19,0 | 18,5 | 18,1 |

## CONCLUSIONS

La bibliographie montre que de nombreux facteurs jouent dans la mise en évidence de l'effet spécifique de la matière organique. L'influence de quelques-uns de ces facteurs a été étudiée à l'aide d'une technique de culture en petits pots sous abri vitré en prenant comme plante-test le Ray-Grass.

Les facteurs relatifs à la plante-test, comme le numéro d'ordre de la coupe et l'importance des rendements, n'ont pas d'action.

L'alimentation hydrique des plantes n'intervient pas dans les conditions de la technique de la culture. Par contre, l'alimentation minérale des plantes joue un rôle important. La matière organique a des effets d' « engrais » variables suivant l'élément considéré : faible pour l'azote, fort pour le phosphore. La neutralisation de l'effet d' « engrais » a été réalisée soit en se mettant à l'optimum de l'alimentation minérale, soit en utilisant une matière organique obtenue à partir d'une paille déminéralisée, les autres facteurs étant non limitants ; ainsi on a pu mettre en évidence l'effet spécifique seul.

Enfin l'étude de certaines caractéristiques de la matière organique utilisée a montré que celle-ci devait avoir atteint un certain degré de décomposition et se trouver en quantité suffisante dans le milieu. La paille avait perdu son effet dépressif après deux mois de décomposition à l'étuve et acquis une action stimulante à partir du troisième mois. Cette action stimulante croîssait avec les quantités présentes dans le milieu jusqu'à la dose de 60 g/1 000 g sol ; un palier apparaissait ensuite pour les doses plus fortes. Le temps de contact de la matière organique normale avec le sol était sans action sur l'intensité de l'effet spécifique.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*

## SUMMARY

### STUDY OF VARIOUS FACTORS AFFECTING MANIFESTATION OF THE SPECIFIC EFFECT OF ORGANIC MATTER ON PLANTS

This investigation was carried out with ray-grass grown in test pots with organic matter derived through wheat straw decomposed under controlled conditions.

The investigated factors play a variable role in manifestation of the specific effect of organic matter, as follows :

— those relating to the test-plant, as well as the sequence number of the cutting and yield index, have no effect;

— the water supply to the plant is not acting in the conditions of growth technic used;

— the mineral nutrient supply plays a major part. Organic matter has a « fertilizer » effect that can be offset either by optimizing mineral nutrition by means of a response curve or by using organic matter derived from decomposition of demineralized straw ; thereby giving rise solely to the specific effect;

— the state of decomposition of organic matter used affects manifestation of the specific effect;

— the amount of organic matter in the medium affects the extent of the specific effect whereas the time between the supply of organic matter to the soil and the sowing is not acting.



## ZUSAMMENFASSUNG

### UNTERSUCHUNG DER VERSCHIEDENEN FAKTOREN, DIE DIE SPEZIFISCHE WIRKUNG DER ORGANISCHEN SUBSTANZ AUF DAS PFLANZENWACHSTUM BEEINFLUSSEN

Diese Studie wurde mit Raigras Kulturen in Gefässen durchgeführt und mit Zusatz von organischen Substanz deren Herkunft verrotettes Weizenstroh war.

Die untersuchten Faktoren haben eine ungleiche Wichtigkeit in der Æuserung der spezifischen Wirkung der organischen Substanz :

— die Reihenfolge der Schnitte und der Ertrag spielen keine Rolle;

— die Bewässerung hat keine Einfluss in den gebrauchten Kulturtechnik;

— die minerale Ernährung spielt eine grosse Rolle. Die organische Substanz hat einen « Dünger » Effect der gehoben werden kann, entweder mit einer optimalen anorganischen Ernährung (mit Hife einer Ertragskurve) oder durch Verwendung einer organischen Substanz die aus der Rotte von entmineralisiertem Stroh herstrummt. So äussert sich die spezifische Wirkung allein;

— der Rottegrad der verwendeten organischen Substanz beeinflusst die Erscheinung der spezifischen Wirkung;

— die Mengen organischer Substanz im Substrat beeinflussen die Intensität der spezifischen Wirkung dagegen die Zeitspanne zwischen dem Einbringen der organischen Substanz und die Saat hat keinen Einfluss.



## РЕЗЮМЕ

### Изучение различных факторов влияющих на проявление специфического эффекта органического вещества у растений.

Ф. ЛЕМЕР.

Изучение проводилось на культурах рай-грасса, в вегетационных сосудах, с органическим веществом полученным от разложения пшеничной соломы в контролируемых условиях.

Изучавшиеся факторы имеют неравное значение для проявления специфического эффекта органического вещества :

— Факторы относящиеся к тестируемому растению, как например порядковый номер укоса, или величина урожая, не имеют значения.

— Водное питание растений можно не принимать во внимание в условиях технической реализации культуры.

— Минеральное питание играет напротив очень важную роль. Органическое вещество может дать эффект « удобрения », который нейтрализуется доведением уровня минерального питания до оптимального, при помощи « ответной » кривой, или применением органического вещества полученного от разложения деминерализированной соломы. В этом случае специфический эффект проявляется сам.

— Степень разложения применяемого органического вещества принимает участие в проявлении специфического эффекта.

— Количества органического вещества находящиеся в среде действуют на интенсивность специфического эффекта, в то время как фактор « время контакта » с почвой не производит никакого действия.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARBIER G., BOISCHOT P., 1954. Cinq années d'expérience sur la fumure à la paille. *C. R. Acad. Agric.*, **40**, 43-49.

BLANCHET R., 1957. Influence des colloïdes humiques sur différentes phases de l'absorption des éléments minéraux par les plantes. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 2418.

BLANCHET R., 1958. Actions directes et indirectes de la matière organique humifiée sur la nutrition des végétaux vasculaires. *Ann. agron.*, **4**, 499-532.

BOISCHOT P., SIMON G., 1958. Décomposition de différentes matières organiques enfouies directement dans le sol. *C. R. XXXI^e Congrès Chimie industrielle*, Liège.

CHAMINADE R., 1952. Recherches sur le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. Influence de l'humus sur la nutrition minérale des végétaux. *Ann. agron.*, **1**, 95-104.

CHAMINADE R., 1954. Réactions de l'*Aspergillus niger* aux substances de croissance présentes dans la matière organique humifiée. *C. R. Acad. Sci.*, **239**, 1844-1846.

CHAMINADE R., 1956. Action de l'acide humique sur le développement et la nutrition minérale des végétaux. *VI^e Intern. Soil Sci. congr.*, Paris, vol D, p. 443.

CHAMINADE R., 1958. Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'azote. *Ann. agron.* **2**, 167-192.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. Types d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron.*, 121-133.

CHAMINADE R., 1963 *a*. Influence de la paille à différents états de fermentation sur la fertilité d'un sol. *Ann. agron.*, **14**, 1, 5-12.

CHAMINADE R., 1963 *b*. Effet physiologique des constituants de la matière organique des sols sur le métabolisme des plantes, la croissance et le rendement. *Report of the FAO/IAEA Technical Meeting*, Brünswick-Völkenrode, p. 35-47.

CHAMINADE R., 1968. Rôle spécifique de la matière organique sur la nutrition et le rendement des végétaux. Semaine d'étude sur le thème *Matière organique et fertilité du sol*. Pontificiae academiae scientiarum scripta varia p. 777-800.

CHAMINADE R., BLANCHET R., 1951. Action de l'humus colloïdal sur la nutrition minérale des végétaux. *C. R. Acad. Sci.*, **233**, 1486.

CHRISTEWA L. A., 1951. Rôle de l'acide humique dans la nutrition des plantes. Engrais humiques. *Travaux de l'Institut Dokutschajev*, **38**, 108-184.

CHRISTEWA L. A., 1953. Participation d'acides humiques et d'autres substances organiques à la nutrition des plantes cultivées. *Pedology*, **10**, 46-59.

CHRISTEWA L. A., 1958. Die stimulierende Wirkung der Hüminsäuren auf die Lebenstätigkeit höherer Pflanzen und die Effektivität der Humindünger in südlicher Gebieten der Ukraine. *Int. Soil. Sci. Congr.*, Hambourg, **11**, 46-55.

CHRISTEWA L. A., 1968. About the nature of physiologically active substances of the soil humus and of organic fertilizers and their agricultural importance. Semaine d'étude sur le thème *Matière organique et fertilité du sol.* Pontificae Academiae scientiarum scripta varia, 701-721.

DAVEY C. B., 1953. Sawdust composts : their preparation and effect on plant growth. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **17**, 1, 59-60.

FIALOVA S., 1969. Influence of sodium humate and nutritive conditions on the content of nucleic acids particularly on the ribosomal ribonucleic acid in wheat roots. *Biol. Plant.*, **11**, 1, 8-22.

FLAIG W., 1955. Über den Einfluss von Spuren von Huminstoffen bzw. deren Modellsubstanzen auf den Pflanzenwachstum. *Land. Forsch.*, **8**, 133-139.

FLAIG W., 1958. La chimie des matières organiques dans le sol et leur effet physiologique. *C. R. 2e et 4e Comm. Assoc. Internat. Sci. Sol.*, **2**, 11-45.

FLAIG W., 1965. Action des produits de dégradation de la lignine sur le métabolisme végétal. Mécanisme possible de cette action. *C. R. Acad. Agric.*, **51**, 17, 1118-1138.

FLAIG W., SAALBACH E., 1956. Zur Kenntnis der Huminsäuren. XII. Mitteilung. Untersuchungen über den Einfluss von Thymohydrochinon als Modellsubstanz von Vorstufen bzw. Abbauprodukten von Hüminsäuren auf die Atmung von Getreide. *Z. Pflanzenernahr.*, **72**, 1, 1-7.

GUMINSKI S., 1950. Recherches sur les conditions et le mécanisme de l'efficacité des composés humiques sur l'organisme végétal. *Acta Soc. Bot. Poloniae*, **20**, 589-630.

GUMINSKI S., 1967. The effect of humus compounds on some physiological processes and plant nutrition. *Transactions of the intern. Symposium Humus et Planta IV*, Prague, 255-264.

GUMINSKI S., SULEJ J., 1967. La relation entre certaines qualités physico-chimiques des composés humiques et leur activité biologique. *Acta Soc. Bot. Pol.*, **36**, 1, 109-122.

HAMENCE J.-H., 1946. Recherche de l'auxine dans les sols. *Analyst*, **71**, 111-117.

HÉNIN S., DUPUIS J., 1945. Bilan de la matière organique des sols. *Ann. agron.*, **1**, 17-30.

HENNEQUIN J-R., JUSTE C., 1967. Présence d'acides phénols libres dans le sol. Étude de leur influence sur la germination et la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **18**, 5, 545-569.

HERNANDO FERNANDEZ V., 1968. The action of humic acid of different sources on the development of plants and their effect on increasing concentration of the nutrient solution. Semaine d'étude sur le thème *Matière organique et fertilité du sol.* Pontificiae scientiarum scripta varia, 805-850.

KONONOVA M. M., 1966. *Soil organic matter.* 2e éd., Pergamon Press.

KUTE J., BLANCHET R., BOSC M., 1967. Influence d'une paille en cours d'humification sur la dynamique du phosphore dans le sol et l'alimentation phosphorique des plantes. II. Alimentation des plantes. *C. R. Acad. Agric., Fr.*, **53**, 17, 1330-1336.

LEMAIRE F., 1967. Influence of organic matter on the phosphate nutrition of plants. *Transactions of the intern. Symposium Humus et Planta IV*, Prague, 302-305.

LEMAIRE F., 1968. Contribution à l'étude des relations entre croissance et évapotranspiration. *C. R. Acad. Agric.*, **54**, 13, 1056-1063.

MAEDER H., 1960. *Chemische und Pflanzenphysiologische Untersuchungen mit Rottestroh.* Inaugural Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der landwirstchaftlichen Fakultät der Justus Liebig-Universität. zu Giessen.

MATHER H., 1965. In *Analyse statistique en Biologie*, 142-149, Gauthier-Villars.

MULLER J., 1966. Observations sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. II. Action sur le bilan de l'azote total du sol. *Ann. agron.*, **17**, 1, 21-36.

NIKLEWSKI D., 1931. Influence des éléments colloïdaux sur la production végétale. *Ann. agron.*, **3**, 337-345.

NIKLEWSKI D., WENGLIKOWSKA E., 1967. The influence of ecologic conditions and of plants on the effectivness of peat preparatures. *Transactions of the intern. Symposium Humus et Planta IV*, Prague, 243-248.

PRAKASH A., RACHID M. A., 1968. Influence of humic substances on the growth of marine phytoplankton. Dinoflagellates. *Limnology and Oceanography*, **13**, 4, 598-606.

PRATT S., 1960. Distribution of the humus substances fractions in plants. *Biol. plant.*, **2**, 4, 308-312.

SAALBACH E., 1957. Zur Kenntnis der Hüminsäuren. XIV. Mitt. Einfluss von Modellsubstanzen von Humusstoffen auf den Stoffwechsel von Getreide. *Landw. Forsch.*, **9**, 7, 95-100.

SANDOZ R., 1945. *Influence de l'aneurine (vitamine $B_1$) sur la croissance de certaines plantes.* Thèse, Neufchâtel soc. genevoise d'éditions et d'impressions.

SLADKY Z., 1962. Bestimmung der optimalen Konzentration der Humusstoffe für das Wachstum der Tomaten Imun. *Pub. Fas. Sci. Univ. J. E. Purkyne Brno* (**436**),— 363-378.

SLADKY Z., TICHY V., 1959. Applications of humus substances to overground organs of plants. *Biol. Plant.*, **1**, 9-15.

SIENKO A., SZCZYPEK, 1969. Der Einfluss des Na-Humats und der Fulvosäuren auf das Wachstum der Tomaten, den Chlorophyllgehalt und das Verhältnis P/Fe in deren Blättern. *Acta agrobotanica*, **22**, 57-70.

SMIDOVA M., 1962. Effect of Na-hu mate on swelling and germination of winter wheat. *Biol. Plantarum*, **4**, 2, 112-118.

SÖCHTIG H., 1964. Beeinflüssung des Stoffwechsels der pflanzen durch Humus and seine Bestandteile und die Auswirkung auf Wachstum und Ertrag. *Landbauforschung*, **14**, 9-16.

TICHY W., 1958. Über den Einfluss einiger Komponenten des Bodenhumus auf das Wachstum des Weizens. *Fol. Biol.*, **4**, 268-269.

TICHY W., 1966. Investigations on the origine and biological activities of humus substances. *Acta Univ. Garolinae-Biologica Supplementum*, **112**, 27-33.

TICHY W., CHALUPOVA-JANOVICOVA J., 1958. Der Einfluss von Humusstoffen auf Keimung und Wachstum einiger Kultur pflanzen. *Folia biol.*, **4**, 281-285.

TICHY W., NECHUTOVA H., 1967. The influence of humus substances on the caloric values of the plant dry matter and on its production. *Transactions of the intern. Symposium Humus et Planta IV*, Prague 291-292.

WENGLIKOWSKA NIEDZWIECKA E., 1967. The influence of humic compounds on the dynamics of assimilable forms of phosphorous and potassium in brown soil. *Transactions of the intern. Symposium Humus et Planta IV*, Prague, 243-248.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (1), 101-114.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

# MOBILISATION DU POTASSIUM DU SOL AU COURS D'UNE CULTURE STANFORD-DE MENT

B. CABIBEL

avec la collaboration technique de Ph. BERTHIER

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,*
*84 - Montfavet*

## RÉSUMÉ

La technique de culture Stanford-De Ment a été appliquée à des échantillons de sols d'origine différente pour préciser les conditions de libération du potassium.

On a évalué les quantités extraites des sols après 5, 7, 14 et 20 jours de culture, de manière à mieux apprécier la dynamique de libération du K. L'évolution du K échangeable du sol et la libération du K non échangeable au cours de la culture ont été précisées.

## INTRODUCTION

L'examen des résultats obtenus dans divers essais de fertilisation de longue durée ayant fait apparaître une discordance entre la richesse des sols en K échangeable et la réponse des cultures vis-à-vis des apports d'engrais potassiques (réponse nulle sur des sols pauvres et très pauvres en K échangeable ; réponse positive sur des sols plus riches), l'étude de la dynamique du K de ces sols a été entreprise.

## I. — MÉTHODE D'ÉTUDE UTILISÉE

Dans le présent travail, la mobilisation du K des sols est étudiée à l'aide du test de culture Stanford-De Ment (DE MENT, STANFORD et BRADFORT, 1959). Divers auteurs (SCOTT et WELCH, 1961), utilisant cette technique de culture, ont montré que celle-ci peut permettre de caractériser les possibilités d'alimentation en K des sols vis-à-vis des récoltes. Cependant, une adaptation et une standardisation de la méthode étant nécessaires pour apprécier et comparer les réserves K mobilisables de sols différents (GARAUDEAUX et QUÉMENER, 1968 ; QUÉMENER et ROLLAND, 1970), nous utilisons dans le présent travail le mode opératoire proposé par ces derniers auteurs.

### 1. 1. — *Principe*

Une culture de jeunes plantules d'orge, alimentées sur sable avec une solution nutritive carencée en potassium, est reportée avec son support inerte sur l'échantillon de sol à étudier. Après un temps de culture déterminé, le potassium est dosé dans le végétal. Le K échangeable des sols étant dosé avant et après culture, on étudie le bilan du K mobilisé.

La quantité de K non échangeable ($K_{NE}$) libérée par le sol, pour une récolte donnée, a pour valeur :

$$K_{NE} = K \text{ exporté} - \Delta K \text{ échangeable}$$

Dans l'évaluation du K exporté à partir du sol par les plants d'orge, il est tenu compte du K apporté par les graines et non de celui contenu dans les racines développées dans le mélange sable-sol, la mesure du K échangeable des sols après culture étant effectuée sur la fraction sol après élimination du sable et des racines. Selon Quémener et Rolland (1970), cette technique aboutirait à une évaluation par défaut de la quantité globale de K exportée par les plants d'orge, le déficit moyen d'estimation étant voisin de 4 p. 100 pour le temps de culture le plus long. L'erreur relative commise étant par ailleurs constante, son importance est nulle dans la comparaison des disponibilités en K des divers sols. Elle pourrait modifier légèrement l'évaluation exacte des quantités de K non échangeable libérées, notamment, pour les sols à faible pouvoir de libération.

La mise en œuvre de cette technique et sa validité impliquent que les conditions théoriques suivantes soient remplies :

— les absorptions minérales à mesurer devant être une fonction directe de l'état du potassium dans le sol, il ne faut pas que les différences de nutrition minérale aient le temps d'avoir des répercussions importantes sur la croissance du végétal. Un temps de contact sol-plante de courte durée est donc nécessaire ;

— les divers sols à étudier doivent être mis au départ de l'étude en présence d'un végétal de développement constant et identique ;

— les conditions physiques propres aux divers sols — et donc très différentes — doivent être, autant que possible, homogénéisées pour ne pas provoquer de différences dans l'implantation racinaire des plants, donc de différences dans leur développement ;

— un grand nombre de répétitions aux divers stades de culture étant nécessaire pour une meilleure approche de la cinétique du phénomène étudié, un faible encombrement des pots de culture utilisés doit être recherché pour une surface de travail donnée.

### 1. 2. — *Matériel*

La technique de culture et la solution nutritive utilisées sont celles mises au point à la Station d'Aspach de la S. C. P. A. (Quémener et Rolland, 1970), avec les modifications suivantes :

— le transfert des plants d'orge carencés en K sur les sols s'effectue 8 jours après semis au lieu de 14 jours, à raison de 30 plants par pot,

— les sols sont maintenus à la capacité de rétention en eau et non aux deux tiers de celle-ci, tout au long de l'essai, deux corrections étant effectuées par jour,

— la dose d'azote appliquée est le double de celle indiquée, des carences en azote ayant été constatées lors d'essais préliminaires,

— les oligo-éléments Cu et Mo sont ajoutés à la solution,

— la solution nutritive est apportée tous les deux jours dès le semis et non à partir du transfert des plants sur les sols à étudier.

La culture est installée dans une enceinte conditionnée pouvant contenir 150 pots. La température est maintenue à 26°C le jour, et à 18°C la nuit. L'éclairage dispensé à la culture après levée des plants, soit trois jours après semis, atteint 20 000 lux à 30 cm au-dessus de la table de travail. La durée du jour est fixée à 14 heures. L'humidité ambiante est maintenue à 80 p. 100. Pour éliminer l'influence des propriétés physiques des divers sols, ceux-ci sont mélangés à du sable à raison de 50 g de sol pour 150 g de sable. C'est sur ce matériau que sont ensuite transférés les plantes et le sable sur lequel elles se sont développées depuis le semis.

### 1. 3. — *Analyses et prélèvements*

La teneur en K échangeable du sol est déterminée avant culture sur un échantillon moyen. Cette détermination est renouvelée au moment de la récolte des plants d'orge sur chaque pot de culture.

Les récoltes sont effectuées après 5, 7, 14 et 20 jours de contact plante-sol. Pour chaque échantillon 4 répétitions sont effectuées par temps de culture. Seules les parties aériennes et les racines contenues dans le sable sont récoltées, pesées en sec et analysées pour détermination du K exporté.

## II. — SOLS ÉTUDIÉS (1)

Les sols étudiés ont des origines géographiques très différentes. Ils proviennent généralement de dispositifs expérimentaux de longue durée, mis en place pour l'étude de la fertilisation potassique. Sauf indication contraire, les échantillons prélevés représentent l'horizon de surface couramment travaillé.

### 2. 1. — *Sols d'alluvions de la Durance et de la basse vallée du Rhône*

Ces sols d'alluvions récentes, fines, et très riches en $CaCO_3$, supportent des cultures variées.

2. 11. *Sol maraîcher de la région Noves-Châteaurenard :* ce sol n'appartient pas à un dispositif expérimental ; il donne de hauts rendements en présence de fortes fumures minérales.

$M_s$ = 0-20 cm
$M_{s/s}$ = 20-40 cm

2. 12. *Rizière expérimentale du Domaine Saint-Paul* (I. N. R. A. Montfavet), où la fertilisation K est sans effet sur les rendements.

$R_s$ = parcelle recevant depuis 1954 240 unités $K_2O$/ha/an, et son sous-sol (20-40 cm) $R_{s/s}$
$Ro_s$ = parcelle témoin sans apport potassique.

2. 13. *Prairie Saint-Paul.*

$SP_s$ = prélevé sur un sol en prairie depuis 80 ans, contigu à la rizière expérimentale et constituant le témoin origine zéro.

2. 14. *Rizière expérimentale de Beauchamp près d'Arles*, où dans un essai NK mis en place en 1962 on n'observe aucune réponse à la fertilisation potassique.

$K_0N_1$ = parcelle témoin.
$K_1N_1$ = parcelle 100 unités $K_2O$/ha/an.

### 2. 2. — *Sols de la Costière du Gard*

Ces sols correspondent à un lœss décarbonaté, décalcifié et soliflué, défini comme sol brun de lehm, et surmontent les cailloutis de la surface post-villafranchienne. Les échantillons de sols, prélevés au domaine d'Asport de la C. N. A. B. R. L., correspondent à deux parcelles d'un dispositif expérimental sur plantes maraîchères, mis en place en 1962. On observe actuellement une différence de 30 p. 100 entre les deux traitements extrêmes :

$T_1$ = parcelle 100 unités $K_2O$/ha/an
$T_6$ = parcelle 300 unités $K_2O$/ha/an

### 2. 3. — *Sols de limon de la Somme*

Ces sols représentent des essais de longue durée installés en 1953 et 1957 à Allonville et Omiécourt sur grande culture. La réponse aux apports de K est positive à Omiécourt, nulle à Allonville.

$Al_0Om_0$ = parcelles témoins
$Al_2Om_3$ = parcelles enrichies (quantités cumulées reçues = 3 000 unités $K_2O$/ha)

(1) Nous remercions les Stations d'Agronomie d'Amiens et de Dijon (I. N. R. A.), la Société Commerciale des Potasses et de l'Azote (S. C. P. A.), la Compagnie d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc (C. N. A. B. R. L.), le Syndicat des Riziculteurs d'Arles, qui nous ont fourni les échantillons de sols de leurs dispositifs expérimentaux.

TABLEAU I

*Caractéristiques physiques et chimiques des sols*

| | $M_S$ | $M_{S/S}$ | $R_S$ | $R_{S/S}$ | $Ro_S$ | $SP_S$ | $K_0N_1$ | $K_1N_1$ | $T_1$ | $T_6$ | $Om_0$ | $Om_3$ | $Al_0$ | $Al_2$ | $V_O$ | $V_M$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teneurs en % | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Argile | 13,6 | 16,1 | 25,5 | 22,0 | 25,0 | 25,0 | 32,0 | 33,0 | 18,5 | 15,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 11,0 |
| Limon fin | 22,9 | 26,0 | 35,5 | 40,0 | 34,0 | 41,0 | 53,0 | 53,0 | 19,5 | 23,0 | 27,5 | 28,5 | 26,5 | 27,5 | 14,0 | 16,0 |
| Limon grossier | 51,5 | 30,0 | 23,7 | 24,0 | 24,0 | 19,0 | 8,4 | 7,4 | 39,7 | 40,7 | 54,5 | 53,5 | 54,9 | 53,8 | 7,3 | 7,6 |
| Sable fin | 5,5 | 21,0 | 9,9 | 10,2 | 10,0 | 10,0 | 1,8 | 1,6 | 19,1 | 18,4 | 4,4 | 4,2 | 3,8 | 3,5 | 9,6 | 8,1 |
| Sable grossier | 4,0 | 4,0 | 1,4 | 1,4 | 3,0 | 3,0 | 0,6 | 0,5 | 5,2 | 4,2 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 53,5 | 54,0 |
| Calcaire total | 44,5 | 46,9 | 38,5 | 40,0 | 38,0 | 37,5 | 34,5 | 35,5 | — | — | 1,0 | 0,8 | 1,5 | 1,3 | — | — |
| Calcaire actif | 9,5 | 10,3 | 13,5 | 14,0 | 13,0 | 13,5 | 20,8 | 21,1 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| pH ($H_2O$) | — | — | — | — | — | — | — | — | 6,6 | 6,1 | 8,10 | 8,10 | 7,90 | 7,85 | 5,5 | 5,6 |
| pH (KCl) | — | — | — | — | — | — | — | — | 6,4 | 5,9 | 7,40 | 7,40 | 7,20 | 7,20 | 5,1 | 5,2 |
| Matières organiques | 4,00 | 2,00 | 3,20 | 4,80 | 3,40 | 3,00 | 1,20 | 1,15 | 1,56 | 1,60 | 1,10 | 1,10 | 1,00 | 1,03 | 1,22 | 1.25 |
| K échangeable en p.p.m. | 324 | 234 | 105 | 86 | 101 | 58 | 197 | 190 | 117 | 144 | 70 | 125 | 109 | 230 | 47 | 78 |

2. 4. — *Sols granitiques à deux micas de la Pierre-qui-Vire* (Yonne)

Dans un essai établi en 1958 sur prairie temporaire présentant un déficit en potasse, on observe une forte réponse aux apports de K.

$V_O$ = parcelle témoin
$V_M$ = parcelle 150 unités $K_2O$/ha/an

Les principales caractéristiques physiques et chimiques de ces sols sont rassemblées dans le tableau 1.

## III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

Compte tenu des répétitions effectuées, les coefficients de variation

$$CV = \frac{\sqrt{\text{variante erreur}}}{\bar{x}} \times 100$$

pour chacun des temps de culture sont respectivement égaux à 3,47, 1,87, 2,79 et 2,64 p. 100 ; pour un même sol, la reproductibilité des résultats est donc très satisfaisante.

3. 1. — *Matière végétale produite* (tabl. 2)

La matière végétale produite par pot augmente régulièrement avec les temps de contact sol-plante. Lorsqu'on calcule pour les temps de culture de 5, 7, 14

TABLEAU 2

*Masse végétale produite*
(en mg de matière sèche par pot)

| Sols | Durée de culture | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 j | 7 j | 14 j | 20 j |
| $M_S$ | 1 635 | 1 961 | 3 422 | 5 192 |
| $M_{S/S}$ | 1 546 | 1 917 | 3 278 | 5 068 |
| $R_S$ | 1 500 | 1 788 | 2 959 | 4 218 |
| $R_{S/S}$ | 1 552 | 1 677 | 2 824 | 4 028 |
| $Ro_S$ | 1 586 | 1 764 | 2 925 | 4 201 |
| $SP_S$ | 1 516 | 1 721 | 2 529 | 3 376 |
| $K_0N_1$ | 1 469 | 1 695 | 3 261 | 4 356 |
| $K_1N_1$ | 1 467 | 1 756 | 3 293 | 4 403 |
| $T_1$ | 1 535 | 1 850 | 2 616 | 3 408 |
| $T_6$ | 1 557 | 1 821 | 2 656 | 3 755 |
| $Om_0$ | 1 530 | 1 815 | 2 740 | 3 549 |
| $Om_3$ | 1 580 | 1 776 | 2 883 | 3 678 |
| $Al_0$ | 1 470 | 1 780 | 2 740 | 3 545 |
| $Al_2$ | 1 520 | 1 813 | 2 800 | 3 664 |
| $V_O$ | 1 380 | 1 756 | 2 451 | 3 136 |
| $V_M$ | 1 420 | 1 740 | 2 510 | 3 280 |

et 20 jours la valeur moyenne des récoltes de l'ensemble des pots et leur écart-type, on obtient des coefficients de variation $\left(CV = \frac{100\ \sigma}{\bar{x}}\right)$ respectivement égaux à 5,08, 4,38, 10,60 et 15,27 p. 100. La quantité de matière végétale produite par les divers échantillons de sols est donc à peu près équivalente jusqu'au 7e jour. Des différences se manifestent ensuite entre échantillons de sols à partir du 14e jour et surtout au 20e jour.

Les écarts constatés sont essentiellement le fait des échantillons renfermant des taux élevés de K échangeable ($M_s$ et $M_{s/s}$) ou des taux très faibles ($V_O$ et $V_M$). Le domaine de validité de la méthode apparaît donc limité aux sols présentant une richesse « moyenne » en potassium échangeable. Une richesse trop élevée favorise la nutrition K des plants dans leur jeune âge et permet ensuite une plus grande croissance, tandis que dans le cas de pauvreté manifeste, la teneur en K échangeable joue le rôle de facteur limitant pour la croissance des plants d'orge. Ces considérations sont étayées par l'examen des teneurs en K des jeunes plants aux 5e et 7e jours. Les taux de K des plants provenant des échantillons $M_s$ et $M_{s/s}$ sont sensiblement plus élevés que la moyenne générale (1,04 et 0,86 p. 100), tandis que pour les plants provenant des échantillons $V_O$ et $V_M$ , ils sont sensiblement plus faibles (0,53 p. 100).

Conformément au principe que nous avons précédemment énoncé, il serait donc nécessaire de limiter le temps de contact sol-plante à 14 jours. Mais QUÉMENER et ROLLAND ayant conclu, lors de l'adaptation de la technique Stanford-De Ment à l'étude du K des sols, qu'un temps de culture de 20 jours est nécessaire pour différencier des sols dont le K échangeable est supérieur à 200 p.p.m. de sol, nous présenterons les résultats obtenus à ce stade. De plus, afin de mieux cerner la dynamique de libération du K des échantillons de sol sous culture, nous présenterons également les résultats obtenus aux stades 5, 7 et 14 jours.

### 3. 2. — *Potassium exporté par la végétation* (tabl. 3)

Les quantités de K exportées par les cultures d'orge, à partir du sol, sont exprimées en p.p.m. de sol. Elles augmentent régulièrement avec le temps de contact sol-plante.

Pour l'ensemble des échantillons de sols étudiés, il apparaît une relation assez étroite entre la quantité de K exportée et la teneur en K échangeable initial ($r = 0{,}875$). Cependant, plusieurs échantillons présentent des écarts sensibles et la relation entre les deux valeurs est surtout marquée pour ceux ayant la même origine ou représentant les traitements d'un dispositif expérimental (couples d'échantillons de la Costière du Gard, de la Somme, de la Pierre-qui-Vire, sols maraîchers) (fig. 1).

L'examen de la progression des exportations de K au cours de la période de culture montre que la dynamique de libération est fonction de la nature du sol ou des enrichissements réalisés par certains d'entre eux. C'est ainsi que pour les échantillons maraîchers, l'examen comparé de la croissance végétale et du K extrait fait apparaître une absorption relative de K très élevée au début de la vie de la plante, ainsi que nous l'avons précédemment signalé. Pour d'autres échantillons, au contraire, le rythme d'extraction de K et le rythme de croissance de la plante sont parallèles ($K_0N_1$), tandis que pour certains autres l'extraction du K par la plante s'accélère en fin de culture ($SP_s$, $Ro_s$).

Les sols fournissant les plus fortes quantités de K en début de culture sont ceux présentant généralement un taux de K échangeable élevé. Inversement, les sols où le K est principalement fourni en fin de culture sont des sols présentant généralement des taux de K échangeable faibles.

L'étude des quantités de K exportées en fonction du temps de culture, montre que la quantité de K disponible et le rythme de son utilisation dépendent de la teneur en K échangeable du sol et de son aptitude à libérer des réserves K non initialement échangeables, l'exportation K maximale réalisée par la culture dans certains sols pouvant être très supérieure au K échangeable du sol.

TABLEAU 3

*Exportation de potassium par la culture en fonction du temps*
(K exprimé en p.p.m. de sol)

| Sols | Durée de culture | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 j | 7 j | 14 j | 20 j |
| $M_S$ | 211 | 258 | 315 | 331 |
| $M_{S/S}$ | 136 | 150 | 241 | 281 |
| $R_S$ | 54 | 76 | 146 | 177 |
| $R_{S/S}$ | 22 | 37 | 98 | 135 |
| $Ro_S$ | 54 | 76 | 193 | 207 |
| $SP_S$ | 32 | 43 | 53 | 96 |
| $K_0N_1$ | 59 | 86 | 157 | 202 |
| $K_1N_1$ | 58 | 75 | 142 | 205 |
| $T_1$ | 32 | 50 | 85 | 110 |
| $T_6$ | 38 | 69 | 124 | 143 |
| $Om_0$ | 11 | 22 | 25 | 34 |
| $Om_3$ | 44 | 49 | 76 | 107 |
| $Al_0$ | 27 | 37 | 62 | 64 |
| $Al_2$ | 78 | 104 | 188 | 207 |
| $V_O$ | 13 | 14 | 21 | 30 |
| $V_M$ | 20 | 26 | 27 | 40 |

L'analyse de l'évolution des différentes formes de K disponibles dans les sols sous cultures devrait alors permettre d'apprécier leur aptitude respective à alimenter en K les récoltes.

### 3. 3. — *Évolution des formes de K dans le sol*

#### 3. 31. *K échangeable* (tabl. 4).

On constate pour tous les sols une chute de la teneur en K échangeable au cours de la culture. Pour des sols de même origine, cette diminution est généralement d'autant plus accusée et elle se manifeste d'autant plus rapidement que la teneur en K échangeable initiale de l'échantillon est plus élevée. Mais pour des échantillons d'origine différente, le rythme de diminution du K échangeable est propre à chaque

groupe d'échantillons. On remarquera en particulier le cas du sol maraîcher $M_{s/s}$ qui a perdu 52 p. 100 de son K échangeable au 5e jour, et celui du sol de rizière $Ro_s$, qui au même stade, n'en a perdu que 2 p. 100.

Ces différences s'estompent à mesure que le temps de contact sol-plante se prolonge, mais restent cependant toujours importantes.

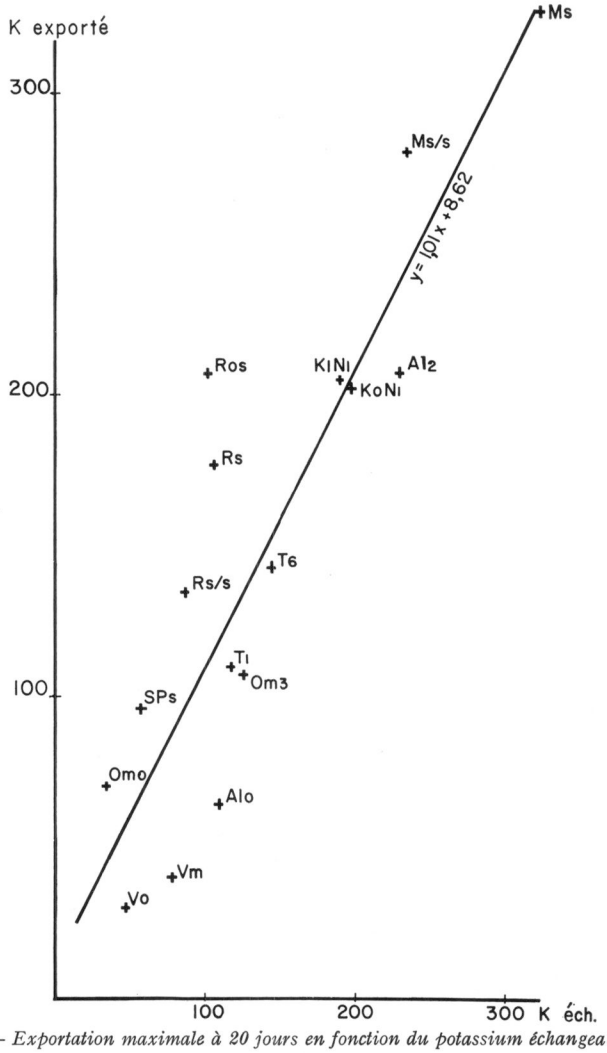



FIG. 1. — *Exportation maximale à 20 jours en fonction du potassium échangeable initial* (K exprimé en p.p.m. de sol)

3. 32. *K non échangeable libéré* (tabl. 4).

Les quantités apparentes de K non échangeable libérées sont calculées par différence entre le K exporté par les plants d'orge et la diminution de K échangeable subie par le sol. Les quantités ainsi libérées sont très variables suivant le type de sol

et le temps de contact sol-plante. Elles sont schématisées en fonction du K échangeable initial des échantillons de sol en figure 2.

La quantité de K non échangeable libérée est très importante et la progression dans le temps très marquée pour les sols d'alluvions de la Durance à l'exception des sols maraîchers $M_s$ et $M_{s/s}$ . Elle demeure importante pour les sols de Beauchamp et se manifeste dès le début de la période de contact, comme cela est également le cas pour les sols de la rizière Saint-Paul. Inversement, dans les sols maraîchers, la libération du K non échangeable se fait essentiellement sentir en fin de période de culture. Pour

TABLEAU 4

*Perte en K échangeable* ($\Delta K_E$) *et K non échangeable libéré* ($K_{NE}$) *par les sols au cours de la culture*

(K exprimé en p.p.m. de sol)

| Temps de culture | | 5 j | | 7 j | | 14 j | | 20 j | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paramètres | | $\Delta K_E$ | $K_{NE}$ | $\Delta K_E$ | $K_{NE}$ | $\Delta K_E$ | $K_{NE}$ | $\Delta K_E$ | $K_{NE}$ |
| sols | $M_s$ | 183 | 28 | 198 | 60 | 240 | 75 | 243 | 88 |
| | $M_{s/s}$ | 132 | 4 | 133 | 17 | 160 | 81 | 170 | 111 |
| | $R_s$ | 9 | 45 | 27 | 49 | 28 | 118 | 29 | 148 |
| | $R_{s/s}$ | 8 | 14 | 19 | 18 | 24 | 74 | 26 | 109 |
| | $Ro_s$ | 2 | 52 | 12 | 64 | 16 | 177 | 19 | 188 |
| | $SP_s$ | 3 | 29 | 4 | 39 | 5 | 48 | 7 | 89 |
| | $K_0N_1$ | 18 | 41 | 18 | 68 | 33 | 124 | 61 | 141 |
| | $K_1N_1$ | 12 | 46 | 6 | 69 | 48 | 94 | 61 | 144 |
| | $T_1$ | 31 | 1 | 43 | 7 | 64 | 21 | 77 | 33 |
| | $T_6$ | 37 | 1 | 52 | 17 | 86 | 38 | 95 | 48 |
| | $Om_0$ | 2 | 9 | 7 | 15 | 10 | 15 | 20 | 14 |
| | $Om_3$ | 23 | 21 | 32 | 17 | 58 | 18 | 63 | 44 |
| | $Al_0$ | 17 | 10 | 23 | 13 | 47 | 15 | 48 | 15 |
| | $Al_2$ | 75 | 3 | 91 | 13 | 148 | 40 | 154 | 53 |
| | $V_O$ | 4 | 9 | 6 | 8 | 8 | 13 | 17 | 13 |
| | $V_M$ | 6 | 14 | 9 | 17 | 10 | 17 | 19 | 21 |

les autres sols (Costière du Gard, Somme, La Pierre-qui-Vire), les quantités de K non échangeable mobilisées sont faibles. La progression demeure sensible pour les échantillons de la Costière du Gard et les sols enrichis de la Somme, tandis qu'elle est peu apparente pour les autres échantillons de sols à partir du 7e jour. Dans ce dernier groupe de sols, les échantillons des parcelles expérimentales enrichies libèrent une quantité $K_{NE}$ plus élevée que les parcelles témoins.

3. 33. *Mobilisation comparée du K échangeable et du K non échangeable* (tabl. 5).

L'exportation K maximale réalisée par la culture ne paraît pas toujours suffisante pour caractériser l'aptitude d'un sol à libérer du potassium. Elle ne permet pas en effet d'apprécier l'état potassique du sol après culture, donc ses possibilités ulté-

rieures de libération. C'est particulièrement le cas des sols à teneur initiale élevée en K échangeable où l'exportation réalisée par la culture se traduit essentiellement par une diminution du taux de K échangeable.

L'ensemble des critères utilisés dans la présente mise en œuvre de la méthode Stanford-De Ment (K exporté, K échangeable initial, ΔK échangeable, K non échangeable libéré) et leur relation en fonction de l'exportation réalisée par la culture doivent dès lors être pris en considération pour juger de la mobilité des réserves potassiques du sol, des conditions de leur utilisation et du devenir potassique du sol après culture.

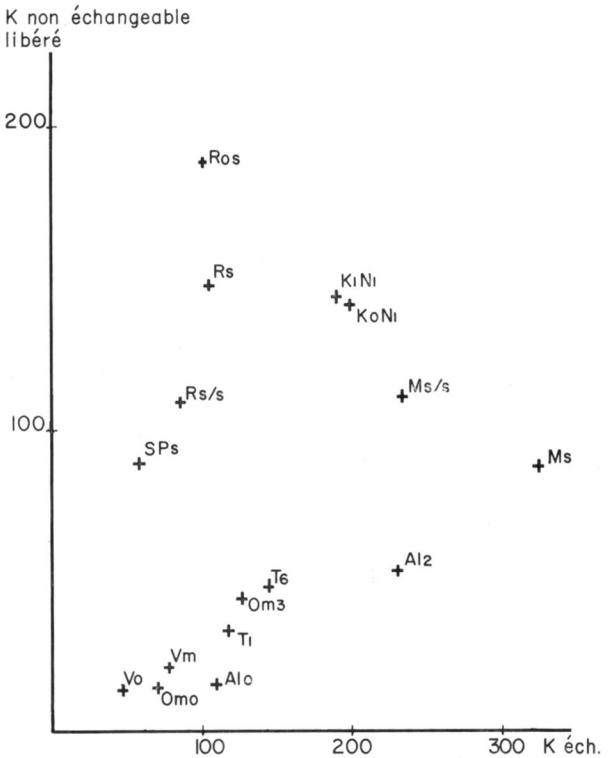



FIG. 2. — *Potassium non échangeable libéré pour une exportation maximale à 20 jours en fonction du potassium échangeable initial*

(K exprimé en p.p.m. de sol)

Lorsque la diminution du K échangeable du sol au cours de la culture est limitée, la part apparente du K échangeable dans l'exportation est faible, la libération et la mobilité des réserves K non initialement échangeables sont comparativement élevées. C'est le cas par exemple de l'échantillon $Ro_s$, alors que l'échantillon $M_{s/s}$ a un comportement opposé.

Cette différence de comportement est schématisée en figure 3 où sont représentées, pour ces deux échantillons, la perte en K échangeable et la libération correspondante en K non échangeable en fonction de l'exportation globale réalisée par la culture. Il apparaît que, pour une exportation globale à 20 jours supérieure à 200 p.p.m., les

deux échantillons accusent respectivement une diminution de K échangeable de 19 et 170 p.p.m. et que la nouvelle teneur en K échangeable de $Ro_s$ est supérieure à celle de l'échantillon $M_{s/s}$. Inversement, l'échantillon $Ro_s$ libère une quantité de K non échangeable beaucoup plus importante que le sol $M_{s/s}$.

La mise en évidence de l'importance relative du K échangeable et du K non échangeable dans le K utilisé par la culture peut donc permettre de juger de l'aptitude des sols à libérer des réserves dont l'amplitude et la mobilité déterminent la quantité globale de K susceptible d'être mise à la disposition de la récolte. Celle-ci est égale à la somme du K échangeable initial du sol et du K non échangeable libéré. Par

TABLEAU 5

*Importance comparée du K échangeable et du K non échangeable dans le K utilisé par la culture*

(en p. 100 du K exporté)

| | K échangeable | | | | K non échangeable | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 j | 7 j | 14 j | 20 j | 5 j | 7 j | 14 j | 20 j |
| $M_s$ | 87 | 77 | 76 | 73 | 13 | 23 | 24 | 27 |
| $M_{s/s}$ | 97 | 89 | 66 | 61 | 3 | 11 | 34 | 39 |
| $R_s$ | 16 | 36 | 19 | 16 | 84 | 64 | 81 | 84 |
| $R_{s/s}$ | 37 | 51 | 25 | 19 | 63 | 49 | 75 | 81 |
| $Ro_s$ | 4 | 16 | 8 | 9 | 96 | 84 | 92 | 91 |
| $SP_s$ | 9 | 9 | 9 | 7 | 91 | 91 | 91 | 93 |
| $K_0N_1$ | 30 | 21 | 21 | 30 | 70 | 79 | 79 | 70 |
| $K_1N_1$ | 21 | 8 | 34 | 30 | 79 | 92 | 66 | 70 |
| $T_1$ | 97 | 86 | 75 | 70 | 3 | 14 | 25 | 30 |
| $T_6$ | 97 | 75 | 69 | 66 | 3 | 25 | 31 | 34 |
| $Om_0$ | 18 | 32 | 40 | 59 | 82 | 68 | 60 | 41 |
| $Om_3$ | 52 | 65 | 76 | 59 | 48 | 35 | 24 | 41 |
| $Al_0$ | 63 | 64 | 76 | 77 | 37 | 36 | 24 | 23 |
| $Al_2$ | 96 | 87 | 79 | 74 | 4 | 13 | 21 | 26 |
| $V_O$ | 31 | 43 | 38 | 57 | 69 | 57 | 62 | 43 |
| $V_M$ | 30 | 35 | 37 | 47 | 70 | 65 | 63 | 53 |

ailleurs, lorsque le K exporté est faible par rapport à la masse de K ainsi définie, les possibilités de fourniture du sol seront assurées pour une plus longue période. C'est le cas, par exemple, des échantillons enrichis de la Somme ou de la Costière du Gard par rapport aux échantillons témoins correspondants.

L'examen des divers paramètres caractérisant l'ensemble des échantillons de sol montre ainsi que :

— pour certains sols, tout se passe comme si le K échangeable était utilisé en priorité, notamment en début de culture, le K non échangeable ne fournissant qu'un faible complément d'alimentation en fin de culture (échantillons maraîchers, échantillons de la Costière du Gard enrichis ou non, échantillons enrichis de la Somme) ;

— pour d'autres échantillons dont la teneur en K échangeable est variable, mais

généralement faible, tout se passe comme si celui-ci était, soit peu utilisé ou laissé intact par la plante, soit, plutôt, constamment renouvelé à partir de réserves K. Dans ces sols, la libération du K régulière tout au long de la culture pourrait constituer une explication de la non réponse de ces sols à la fumure potassique (sols de rizières et à un degré moindre, sol $SP_s$) ;

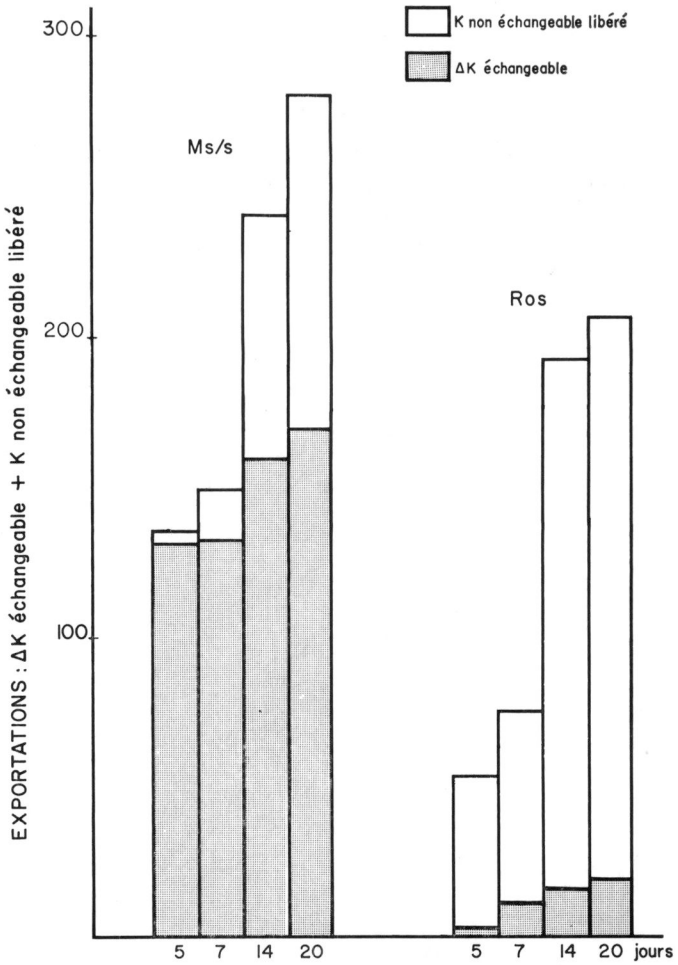



FIG. 3. — *K échangeable et K non échangeable libéré pour les exportations obtenues à 5, 7, 14 et 20 jours de culture*
(K exprimé en p.p.m. de sol)

— dans d'autres échantillons enfin, dont la teneur en K échangeable est généralement faible, tout se passe comme si la quantité globale de K disponible était faible. Elle constitue dès lors un facteur limitant pour la culture dès son implantation (échantillons de la Pierre-qui-Vire, d'Omiécourt $Om_0$) ; l'échantillon $Al_0$ occupe une position intermédiaire.

## CONCLUSION

L'aptitude d'un sol à alimenter en K une récolte peut être étudiée au moyen du test Stanford-De Ment. Celui-ci permet d'apprécier la masse globale de K, échangeable ou non, immédiatement disponible pour la végétation, la dynamique relative de libération des deux états du K disponible du sol et l'état potassique d'un échantillon de sol après culture.

Les résultats obtenus, dans des conditions expérimentales définies, montrent cependant que dans des sols très riches ou très pauvres en K échangeable, il est difficile de préciser les conditions de mobilisation des réserves K susceptibles d'intervenir à moyen terme dans l'alimentation de la plante. La mobilisation de ces réserves exigerait dans le cas des sols riches une prolongation du temps de contact sol-plante incompatible avec le principe même de la méthode. Dans le cas des sols pauvres, un déficit d'alimentation potassique peut dès le départ de la culture constituer un facteur limitant de la croissance des plantes. La méthode pourrait cependant permettre de caractériser les différences de comportement des sols à faible taux de K échangeable selon leurs aptitudes à libérer du K initialement non échangeable.

*Reçu pour publication en octobre 1971.*

## SUMMARY

### PUTTING POTASSIUM OF THE SOIL IN ACTION USING THE STANFORD-DE MENT CULTURAL WORKING METHOD

The Stanford-De Ment cultural working method has been applied to samples of various soils to ascertain the conditions under which potassium is released.

To evaluate fairly accurately the rate of release of K, the relevant amounts were determined after, 5, 7, 14 and 20 days of cultivation. Both developments of the K exchangeable in the soil and release of the non-exchangeable K during cultivation are set forth.

## ZUSAMMENFASSUNG

### MOBILISIERUNG DES KALIUMGEHALTS DES BODENS IM VERLAUF EINER STANFORD-DE MENT-KULTUR

Zur Ermittlung der Bedingungen, die zum Freiwerden des Kalium führen, wurde die Technik der Stanford-De Ment-Kultur bei Mustern von Bodenarten verschiedener Herkunft angewandt.

Die extrahierten Salzmengen der Böden wurden nach 5, 7, 14 und 20 Kulturtagen berechnet, was eine bessere Beurteilung der Dynamik des Freiwerden von Kalium gestattete.

Die Entwicklung des im Boden enthaltenen austauschbaren Kaliums sowie das Freiwerden des im Verlauf der Kultur festgestellten, nicht-austauschbaren Kaliums wurden präzisiert.

## РЕЗЮМЕ

Мобилизация калия почвы при культуре Станфорда де Мента.

Б. КАБИБЕЛЬ.

Для уточнения условий освобождения калия техника культуры Станфорда де Мента применялась на разных почвенных образцах.

Количества калия, экстрагированные после 5, 7, 14 и 20-ти дневной культуры, определялись таким образом, чтобы возможно лучше оценить динамику освобождения этого элемента. Уточнены также и эволюция обменного калия почвы, и освобождение калия необменного за время культуры.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


De Ment J. D., Stanford G., Bradfort B. N., 1959. A method for measuring short term nutrient absorption by plants : Potassium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 47-50.

Garaudeaux J., Quémener J., 1968. Étude de la libération du potassium en culture en pot. *IX^e Congrès International de la Science du Sol.* Adelaïde, Australie, 639-647.

Quémener J., Rolland D., 1970. Application de la technique de Stanford et De Ment à l'extraction du potassium des sols. *Ann. agron.*, 819-844.

Scott A. D., Welch L. F., 1961. Release of non exchangeable soil potassium during short periods of cropping and sodium tetraphenylboron extraction. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 128-132.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (1), 115-117.

# CHRONIQUE DES LIVRES

FRIPIAT (E.), CHAUSSIDON (J.) et JELLI (A.). — CHIMIE PHYSIQUE DES PHÉNOMÈNES DE SURFACE — APPLICATIONS AUX OXYDES ET AUX SILICATES. — Masson, Paris, 1971, 387 p.

Cet ouvrage constitue une initiation à l'étude des phénomènes qui se manifestent aux interfaces solide — gaz ou solide — liquide. Il est divisé en trois parties.

*La première partie* traite essentiellement de la description du comportement de la surface solide idéale par une approche thermodynamique. Elle regroupe trois chapitres qui sont respectivement la thermodynamique des interfaces, l'adsorption physique et l'application de la mécanique statistique aux phénomènes d'adsorption. Les phénomènes mis en jeu relèvent d'interactions de faible énergie, d'où une spécificité de ces interactions peu marquée. Globalement, il s'agit du domaine de l'adsorption physique.

*La seconde partie* a trait à la description de la surface vraie et de sa réactivité. Elle contient les sept chapitres suivants : la chimisorption et son énergétique, l'étude spectroscopique de l'adsorption, les relations entre les propriétés de surface et la catalyse hétérogène, la surface électriquement chargée et l'interaction avec les électrolytes, l'échange ionique, l'intervention de la surface dans les réactions en phase solide et les dérivés organiques de surfaces minérales. D'une façon générale, les interactions qui sont décrites sont caractérisées par des énergies plus élevées qu'au cours de l'adsorption physique, et elles ont le plus souvent une spécificité marquée. Le chapitre sur l'étude spectroscopique de l'adsorption est placé là d'une façon un peu arbitraire, encore qu'historiquement les liaisons entre la spectroscopie et la catalyse en justifient la présence.

*La troisième partie* traite du milieu poreux en deux chapitres qui sont respectivement « l'obtention de solides de surface spécifique élevée » et « la porosité et le frittage ».

*Enfin, un appendice* rappelle succinctement les structures des grandes classes de composés solides auxquels il est fait référence tout au long de l'ouvrage.

Ce traité s'adressant à de jeunes chercheurs ou à des étudiants de troisième cycle, un effort constant a été fait pour que d'une part, les données théoriques soient rappelées d'une façon complète, et que d'autre part, les exemples d'application choisis soient représentatifs et interprétés d'une manière aussi poussée que possible. Les introductions théoriques font toujours l'objet de renvois aux traités fondamentaux.

L'originalité de cet ouvrage réside dans le fait qu'il rassemble un assez grand nombre d'exemples d'application, aux cas des argiles et des oxydes, de théories ou de techniques physico-chimiques très diverses.

On peut donc penser que ce livre est susceptible d'intéresser un agronome, en lui permettant à la fois de trouver réunis certains éléments théoriques fondamentaux figurant trop souvent d'une façon éparse dans la littérature scientifique, et une description précise des possibilités qu'offre la technologie moderne pour l'étude des réactions se développant dans un milieu hétérogène.

J. C.

BERTIN (E. P.). — PRINCIPLES AND PRACTICE OF X-RAY SPECTROMETRIC ANALYSIS. — New York (London), Plenum Press, 1970, 679 p.

Cet ouvrage est consacré à une technique d'analyse utilisée aujourd'hui largement dans un grand nombre de domaines comme la chimie, la métallurgie, la géologie, aussi bien en recherches que dans les applications pratiques.

Les premiers chapitres traitent des fondements théoriques de la spectrométrie aux rayons X, du point de vue de la nature des phénomènes physiques impliqués.

Plusieurs chapitres sont consacrés à la description des spectromètres, — leur constitution, leurs perfectionnements et leur utilisation.

Les méthodes diverses d'analyse qualitative et quantitative sont ensuite présentées ; on trouve une discussion sur les renseignements qu'elles apportent, ainsi que sur la précision des résultats.

Deux chapitres spéciaux traitent de la préparation des divers types d'échantillons.

Des méthodes et applications particulières, moins répandues, sont présentées dans les derniers chapitres ; on y trouve également les applications possibles de ces méthodes.

L'ouvrage comporte des tables de constantes physiques et une bibliographie abondante.

M. M.

RODIER (J.). — ANALYSE CHIMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU. — Paris, Dunod, 1971, 700 p.

Ce livre est divisé en deux grandes parties, l'une consacrée aux eaux naturelles, l'autre aux eaux résiduaires.

Chaque partie comporte essentiellement deux aspects : l'analyse physico-chimique en général et celle appliquée plus particulièrement à la pollution.

Les méthodes de mesure et de dosage pour les diverses propriétés sont décrites en détail. L'accent est mis surtout sur le problème des divers types de pollution et des moyens de les combattre. On y trouve en particulier, pour les eaux naturelles, des chapitres consacrés aux éléments toxiques et aux micropolluants organiques ; pour les eaux résiduaires, des méthodes de dosage particulières sont présentées, correspondant aux divers polluants actuellement connus. Des chapitres spéciaux sont consacrés, dans les deux parties, à la radioactivité de l'eau et à sa détection.

Des chapitres annexes traitent de l'utilisation des statistiques dans l'analyse hydrologique, de certaines techniques de dosage, de méthodes spéciales de purification de certaines eaux.

Un chapitre est consacré plus particulièrement aux hydrocarbures polycycliques aromatiques ; un autre chapitre spécial pose le problème de la biodégradabilité des détergents anioniques.

De nombreuses annexes sont jointes ; certaines sont des tables de valeurs et des indications techniques, d'autres portent sur les normes et législations actuelles sur la pollution, en France et à l'étranger.

M. M.

SCHUURMAN (J. J.) et GOEDEWAAGEN (M. A. J.). — METHODS FOR THE EXAMINATIONS OF ROOT SYSTEMS AND ROOTS. — Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), 1971, 86 p.

Cet ouvrage est consacré à l'un des aspects de l'étude physiologique et écologique des systèmes racinaires, à savoir les méthodes d'investigation morphologique, telles qu'elles sont appliquées à l'Institut pour la Fertilité du Sol de Haren (Groningen), Pays-Bas.

L'introduction traite des principaux caractères ayant une importance éco-morphologique : le nombre de racines, la longueur, le diamètre, les ramifications, la distribution des racines dans le sol, leur étendue en largeur et en profondeur, leur rythme de développement.

On trouve des descriptions détaillées des méthodes d'étude de ces propriétés ; certaines de ces méthodes sont adaptées pour les essais en champ, d'autres pour les essais en vases. Des chapitres sont ainsi consacrés à la méthode de la planche cloutée, à l'échantillonnage par sondes, aux excavations, aux divers modes de culture en containers et sur milieux artificiels. Pour chacune de ces méthodes, il est traité des problèmes et des difficultés ainsi que de la fiabilité des mesures.

Cette édition est la seconde parue et comporte certains perfectionnements intervenus depuis la première, parue en 1965 ; on y trouve, en particulier, une routine semi-automatique pour le nettoyage des racines lors des échantillonnages par sonde.

L'ouvrage comporte de nombreuses illustrations, des appendices de description schématique des systèmes racinaires et une bibliographie relativement importante.

M. M.

I. RAPP (M.). — CYCLE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS QUELQUES ÉCOSYSTÈMES MÉDITERRANÉENS. — pp. 19-184.

II. BACHELIER (G.) et COMBEAU (A.). — DYNAMIQUE SAISONNIÈRE DE DEUX SOLS EN CLIMAT TEMPÉRÉ. — pp. 185-253.

Paris, Éd. du C. N. R. S., 1971, 253 p. (Programme biologique international — Recherche coopérative sur programme du C. N. R. S. nº 40 — Écologie du sol.)

Ce livre comporte deux parties, chacune représentant un travail scientifique distinct. Une partie introductive présente le deuxième volume des travaux de la R. C. P. 40, les participants à ce programme et les publications déjà parues.

Le premier travail présenté est consacré à l'étude des écosystèmes à végétation sempervirente et sclérophylle du bassin méditerranéen, qui n'avaient pas encore été étudiés jusque-là. Ces informations correspondant à des conditions bioclimatiques particulières sont étudiées ici du point de vue du mouvement des éléments chimiques essentiels dans le sol et en général du cycle de ces éléments dans ces phytocénoses. Les formations étudiées sont le peuplement de chêne vert du Rouquet et la garrigue du Puech-du-Juge.

L'auteur traite des divers types d'échanges entre la végétation et le sol, des facteurs qui influent sur ces échanges et des méthodes de leur étude.

Deux annexes sont jointes, l'une consacrées aux méthodes d'analyses chimiques, l'autre aux classifications des cycles biogéochimiques.

Le deuxième travail présenté dans ce livre est consacré à la dynamique saisonnière des propriétés physico-chimiques de deux sols : le sol podzolique à pseudogley de la forêt de Sénart et le sol brun calcaire du parc de Brunoy. Pour ces deux sols il est traité des variations de certaines propriétés comme la structure, les caractéristiques mécaniques, l'atmosphère du sol, les caractéristiques chimiques, les relations eau-sol et l'activité biologique. Les résultats obtenus sont présentés, avec une discussion des méthodes d'étude utilisées.

M. M.

Szabolcs (I.). — European solonetz soils and their reclamation. Budapest, Akademiai Kiado, 1971, 204 p.

Les sols sodiques à structure dégradée, des groupes sols salés à alcali, solonetz, solod, couvrent en Europe plus de 75 p. 100 de la surface affectée par des phénomènes d'halomorphie, lesquels constituent, pour l'agriculture, un facteur limitant de première grandeur.

C'est pour mieux faire connaître ces sols et les problèmes qui s'y rattachent, que cet ouvrage a été élaboré par un groupe de chercheurs appartenant aux pays d'Europe dans lesquels ces phénomènes sont très fréquents : Union soviétique, Hongrie, Roumanie, Bulgarie, Tchécoslovaquie, Yougoslavie et Espagne.

Préfacé par le président et le secrétaire général de l'I. S. S. S., (International Society of Soil Science), le livre fournit des informations très complètes se situant à quatre niveaux ; inventaire cartographique et classification, genèse et dynamique, amélioration et mise en valeur, bibliographie exhaustive figurant en annexe.

L'inventaire cartographique est réalisé sur une carte d'Europe où sont localisées les aires soumises aux phénomènes d'halomorphie. On constate que l'Union soviétique et la Hongrie renferment de vastes zones de solonetz : plus de 20 millions d'hectares, ce qui représente, en superficie, près de la moitié de la France.

La légende de cette carte est évidemment très simplifiée, mais on trouvera dans le livre, des renseignements très détaillés sur la classification des sols sodiques susceptibles d'être observés en Europe.

En ce qui concerne la genèse des sols sodiques, les auteurs analysent les principaux facteurs entrant en jeu : climat, nature des nappes phréatiques, topographie, etc., et étudient également la répartition des éléments solubles et échangeables dans le profil, ce qui permet de séparer différentes catégories de solonetz, sols à alcalis et solods.

Du point de vue de la mise en valeur — et c'est là un aspect particulièrement important pour l'agronome — les auteurs rendent compte d'essais et d'expérimentations variés intéressant le drainage, les amendements gypseux, les façons culturales, la fertilisation, les cultures améliorantes, les irrigations, etc.

Enfin, une dernière partie est constituée par une bibliographie très complète de notes et mémoires publiés entre 1960 et 1969 et concernant les sols sodiques d'Europe.

Cet ouvrage particulièrement bien documenté devrait intéresser toutes les personnes préoccupées par des problèmes de salinité, qu'il s'agisse d'études pédologiques ou de problèmes de mise en valeur.

J. S.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *résumé* en anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves* : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

# annales agronomiques

Bimestriel

1972

Vol. 23 . N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1972, **23** (2), 123-143.

# EFFET LOCAL D'UN BRISE-VENT MINCE SUR LA DISPERSION DES POLLUANTS ÉMIS AU NIVEAU DU SOL

Y. BELOT, C. CAPUT, G. GUYOT* et C. SAMIE*

*Département de la Protection sanitaire,*
*Section de Radioécologie, C. E. A.,*
*92 - Fontenay-aux-Roses*

* *Station de Bioclimatologie, I. N. R. A.,*
*84 - Montfavet*

## RÉSUMÉ

Des expériences sur le terrain ont été effectuées en vue d'étudier les effets de différents brise-vent minces sur la diffusion turbulente des polluants gazeux ou particulaires non sédimentables émis au niveau du sol. Au cours de chaque expérience des particules submicroniques fluorescentes étaient émises pendant vingt minutes à partir d'une source ponctuelle placée au sol en amont d'un brise-vent artificiel de porosité et de perte de charges connues. Les concentrations en différents points de l'espace étaient déterminées par analyse fluorimétrique des poussières prélevées sur des filtres. Le réseau de prélèvement comportait 50 filtres répartis sur 5 niveaux différents. Simultanément le champ des vitesses et des températures était exploré pour connaître les caractéristiques de l'écoulement. Les résultats montrent que dans les conditions des expériences certains brise-vent perméables n'ont pratiquement aucune action sur la diffusion des particules. Au contraire les brise-vent imperméables en créant une ascendance mécanique brutale de l'air surélèvent le nuage de particules et reportent les maxima de concentration à une altitude où les polluants ne sont plus nuisibles. Ces résultats ont été obtenus dans le cas d'un vent relativement fort, d'un gradient vertical de température suradiabatique et d'une implantation dans une zone à forte rugosité. Ils ne peuvent apparemment pas être étendus à d'autres régions caractérisées par des conditions de turbulence mécanique et thermique différentes, qui nécessiteraient des expériences particulières.

## I. — INTRODUCTION

Lorsqu'un polluant diffuse au-dessus d'un terrain plat, ne comportant pas d'obstacle, on peut dans une certaine mesure prévoir les concentrations et les dépôts au niveau du sol en un point donné du terrain. Pour cela des formules mi-théoriques, mi-empiriques sont appliquées qui furent développées à la suite des travaux de SUTTON (1953), PASQUILL (1962), CHAMBERLAIN (1953). Ces formules rendent compte avec

une assez bonne concordance des résultats effectivement obtenus sur des terrains parfaitement dégagés. Lorsque le polluant diffuse au-dessus d'une zone hétérogène, les formules ne sont plus applicables. Les obstacles à l'écoulement de l'air appelés « brise-vent », au sens général du terme, induisent des modifications dans les phénomènes de diffusion turbulente et de dépôt des gaz et des particules atmosphériques. L'objectif du présent travail a été d'étudier dans une région où l'écoulement de l'air est fortement perturbé, l'effet de différents types de brise-vent minces sur la dispersion de polluants particulaires fins émis au niveau du sol à partir d'une source ponctuelle située en amont du brise-vent. Les objectifs à plus long terme portent sur l'utilisation de rideaux de plantes pour protéger les personnes et les bâtiments contre les polluants, au sens large, accumulés au niveau du sol, grosses poussières d'origine industrielle ou provenant de l'érosion du sol, particules fines et gaz émis par les véhicules.

*Effet d'un brise-vent mince isolé sur l'écoulement de l'air*

Le cas le plus simple est celui d'un vent qui souffle perpendiculairement à l'obstacle sans épaisseur, de longueur infinie, implanté sur une surface plane et horizontale. La réduction de vitesse de vent dépend de divers paramètres : hauteur, porosité, et coefficient de perte de charge du brise-vent, rugosité du sol, stabilité thermique des basses couches et vitesse du vent.

De nombreux travaux (O. M. M., 1964) montrent que, toutes autres conditions restant égales, l'extension de la zone protégée est sensiblement proportionnelle à la hauteur du brise-vent. Aussi, afin de pouvoir effectuer commodément des comparaisons entre différents rideaux protecteurs leur hauteur est-elle généralement prise comme unité de mesure des distances et des altitudes. Cependant du fait du rôle important joué par la turbulence atmosphérique, il faut tenir compte dans ces études comparatives des dimensions de l'obstacle par rapport à celles des tourbillons.

Lorsqu'un flux d'air rencontre un brise-vent imperméable (fig. 1 A), il est dévié dans sa totalité vers le haut. La section de passage de l'air étant alors réduite, la vitesse

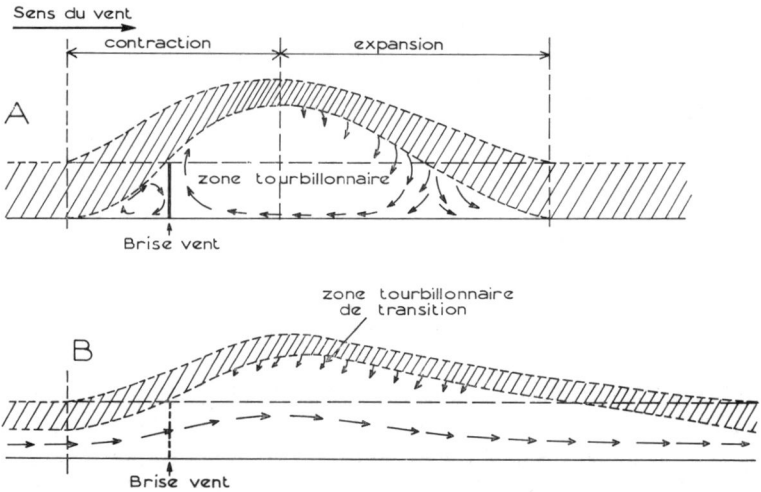



FIG. 1. — *Représentation schématique de l'écoulement de l'air*
A : cas du brise-vent imperméable
B : cas du brise-vent perméable

de l'écoulement s'accroît dans cette zone et la pression statique diminue (loi de BERNOUILLI). Cette diminution de pression crée un appel d'air qui se traduit par un mouvement ascendant dans la zone située immédiatement en aval du brise-vent. Dans la deuxième partie de son parcours la veine reprend progressivement ses dimensions primitives, la vitesse de l'air diminue et la presson statique augmente. Des filets d'air peuvent alors se détacher de la veine défléchie et aller alimenter le vaste tourbillon qui occupe toute la zone qu'elle délimite. Ceci permet de comprendre l'existence au niveau du sol d'un courant de retour, de sens opposé à l'écoulement général. Comme la veine défléchie est en état de dépression, elle a tendance à se rabattre très rapidement vers le sol.

Dans le cas d'un brise vent perméable (fig. 1B), une partie seulement du flux d'air incident le contourne. L'accroissement de vitesse dans la veine défléchie est donc plus faible et la dépression moins importante. Par ailleurs, comme un certain débit d'air passe à travers l'obstacle, le mouvement tourbillonnaire ne se produit plus, ni le courant de retour. Les lignes de courant présentent seulement un léger soulèvement de leur trajectoire, le rabattement de la veine défléchie est plus progressif.

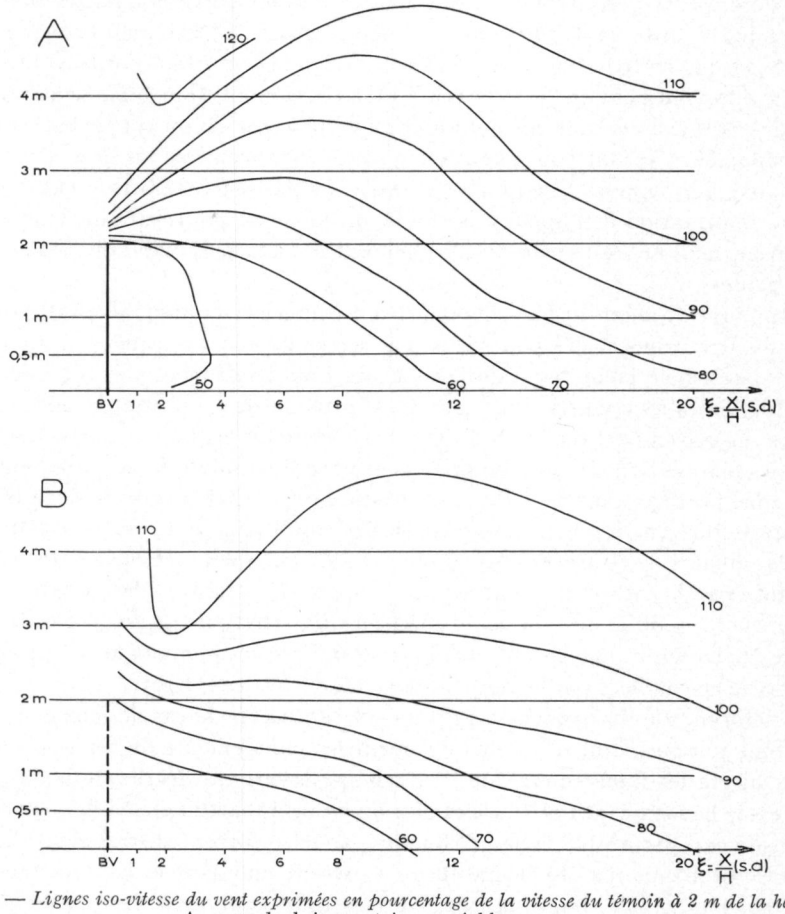



FIG. 2. — *Lignes iso-vitesse du vent exprimées en pourcentage de la vitesse du témoin à 2 m de la hauteur*
A : cas du brise-vent imperméable
B : cas du brise-vent perméable (K = 2,55)

Les figures 2A et 2 B représentent les courbes iso-vitesse au voisinage d'un brise-vent imperméable et des brise-vent de porosité géométrique voisine de 50 p. 100 utilisés lors de l'expérience. Elles mettent en évidence les perturbations introduites par l'obstacle dans le champ des vitesses.

La porosité n'est pas le seul paramètre à considérer, de récentes expériences ont montré que l'efficacité dépendait également de la forme et de la dimension des trous. Il serait donc souhaitable de caractériser les brise-vent par leur cœfficient de perte de charge $K = 2 \Delta P/\rho u^2$, où $\Delta P$ est la chute de pression, $u$ la vitesse, $\rho$ la densité de l'air. Ce coefficient est pratiquement indépendant de $u$ dans la gamme habituelle des vitesses du vent.. Un essai effectué sur deux brise-vent en matière plastique de porosités géométriques très voisines (50 et 52 p. 100) mais de coefficients de perte de charge différents (2,85 et 1,43) a d'ailleurs montré que leurs effets aérodynamiques différaient nettement l'un de l'autre (GUYOT, 1970 *a*).

*Effet d'un brise-vent mince isolé sur la dispersion des polluants émis du sol*

La description précédente et l'examen des figures correspondantes permettent de penser que les brise-vent devraient avoir une action significative sur la dispersion des polluants, et que cette action serait différente selon la porosité du brise-vent. Dans le cas d'une émission ponctuelle au niveau du sol en amont d'un brise-vent mince, les phénomènes prévisibles sont une déformation du panache et son appauvrissement. Ces deux phénomènes auront pour effet de modifier les concentrations de polluant en un point donné, par rapport à ce qu'elles seraient en l'absence de brise-vent. Généralement, la déformation et l'appauvrissement du panache pourront coexister mais on peut penser que l'un ou l'autre de ces phénomènes sera prépondérant, selon la taille des particules.

L'appauvrissement du panache par dépôt sera *a priori* prépondérant dans le cas des grosses particules et des poussières (particules plus grosses que 5 $\mu$). Celles-ci ne suivront pas exactement les mouvements de l'air environnant et s'en écarteront sous l'effet des forces d'inertie et de gravité. Une partie de ces particules aura tendance à se déposer par impaction sur le rideau brise-vent lui-même (en particulier sur les feuilles des plantes dans le cas d'un brise-vent naturel) tandis que les autres, entraînées dans la zone protégée, auront une sédimentation plus rapide par suite de la réduction de la vitesse du vent et de la modification des conditions de turbulence (BUSINGER, 1965). Par ailleurs, la remise en suspension des particules déposées sera d'autant moins importante que la vitesse du vent sera plus faible (BAGNOLD, 1960 ; CORN, 1964), ce qui accentuera la différence de dépôt observée. Ces effets n'ont pas été étudiés dans le cas des poussières, mais ils ont été observés dans le cas homologue des grosses particules de neige soufflées par le vent (BASOV, 1948 ; NAGELI, 1953).

La déformation du panache sera prépondérante dans le cas des gaz et particules fines submicroniques, qui suivront fidèlement les mouvements du fluide porteur. Le panache suivra les mouvements de l'air tels qu'ils ont été décrits ci-dessus. Il sera aspiré vers le haut devant l'obstacle et plus ou moins rabattu derrière lui ; en présence d'un brise-vent perméable, une partie du panache filtrera directement à travers celui-ci. Ce problème n'a été étudié jusqu'à présent que dans le cas d'obstacles épais (bâtiments) (HALITSKY, 1963 ; MUNN et COLE, 1967). Comment les profils verticaux de concentration sont-ils altérés, par rapport à la situation qui ne comporte pas de

brise-vent ? Existe-t-il, comme on pourrait le penser, un mélange accru des couches d'air inférieures et supérieures, par suite des mouvements verticaux de l'air induits par le rideau protecteur ? Dans le cas d'une source au sol, le brise-vent entraîne-t-il une élévation de l'axe du panache, qui normalement reste au niveau du sol dans le cas d'un terrain plat et dégagé ? C'est à l'ensemble de ces questions que l'expérience entreprise se proposait de répondre.

## II. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Une première série d'expériences a été effectuée au cours de l'été 1970 en vue d'étudier la déformation d'un panache de particules fines produit en amont d'un brise-vent mince à partir d'une source ponctuelle émettant en continu. Différents types de brise-vent artificiels ont été essayés. Dans tous les cas, la mesure des concentrations de polluant en différents points de l'espace a été accompagnée de la mesure des vitesses de l'air et de la mesure des gradients de température pour relier la déformation du panache aux paramètres micrométéorologiques.

### 2. 1. — *Choix du terrain et des brise-vent*

Le terrain, appartenant à la Station de Bioclimatologie de l'I. N. R. A. à Montfavet, a été choisi du fait de sa situation dans la vallée du Rhône qui jouit d'une probabilité importante de vents orientés dans la même direction (environ 200 jours de mistral par an), ce qui permet une implantation fixe du brise-vent (perpendiculairement à la direction du vent dominant) et du matériel expérimental de prélèvement et de mesures micrométéorologiques.

Nous avons pu réaliser en mai 1970 deux essais en l'absence de brise-vent, trois avec un brise-vent imperméable, trois avec un brise-vent de porosité 0,50 et des mailles de l'ordre du millimètre (K = 2,55), et trois avec un brise-vent de porosité identique, mais des mailles de l'ordre du centimètre (K = 1,43).

### 2. 2. — *Aérosol utilisé*

L'aérosol est produit par un générateur spécialement étudié pour les essais en plein champ, essentiellement caractérisé par un débit relativement important (7,5 litres à l'heure de solution alcoolique du traceur dans nos conditions d'utilisation) et une granulométrie assez fine et peu dispersée.

Ce générateur, dont les conditions de fonctionnement ont été définies expérimentalement en adoptant plusieurs réglages et en mesurant lors de chaque essai le débit d'aérosol et la granulométrie, comporte cinq atomiseurs Giesler modifiés (les orifices de liquide étant ramenés de 1 mm à 0,3 mm), alimentés d'une part en air filtré comprimé sous sept bars, d'autre part en éthanol contenant le traceur (uranine), par l'intermédiaire d'une cuve à niveau constant enterrée à une profondeur de 50 cm, le plan des gicleurs étant, lui, au niveau du sol.

La concentration de la solution d'uranine a été fixée à une valeur de 5 g par litre d'éthanol, ce qui, pour des émissions de 20 minutes, représente une masse d'aérosol de 12,5 g, suffisante, compte tenu de la dimension du terrain expérimental, du débit des appareils de prélèvement et de la sensibilité de mesure.

Sur le terrain, la granulométrie de l'aérosol a été contrôlée en utilisant un impacteur d'Andersen à sept étages prélevant quelques minutes dans le panache. L'étalonnage de cet appareil a fait l'objet de différentes publications, notamment par May (1964) et Andersen (1967). Les diamètres de coupures (cut-off), exprimés en microns, s'établissent pour les différents étages aux valeurs suivantes : étages n° 7 : environ 0,2 ; n° 6 : 0,54 ; n° 5 : 0,86 ; n° 4 : 1,53 ; n° 3 : 2,95 ; n° 2 : 5,35. (On appelle diamètre de coupure, celui qui correspond, sur la courbe d'efficacité de captation d'un étage, à un rendement de 50 p. 100.)

### 2. 3. — *Dispositif expérimental*

La bonne probabilité d'observer un vent de direction connue et stable en moyenne a permis d'équiper le terrain expérimental une fois pour toutes, seul le brise-vent de hauteur H = 2 m et de longueur 100 m étant susceptible d'être changé ou enlevé d'un essai à l'autre. La figure 3 repré-

sente l'implantation d'ensemble. L'unité de longueur est la hauteur H du brise-vent et l'origine des abscisses est le pied du brise-vent. L'origine des cotes est le niveau du sol. Par convention, les points situés en amont du brise-vent ont leur abscisse affectée du signe moins.

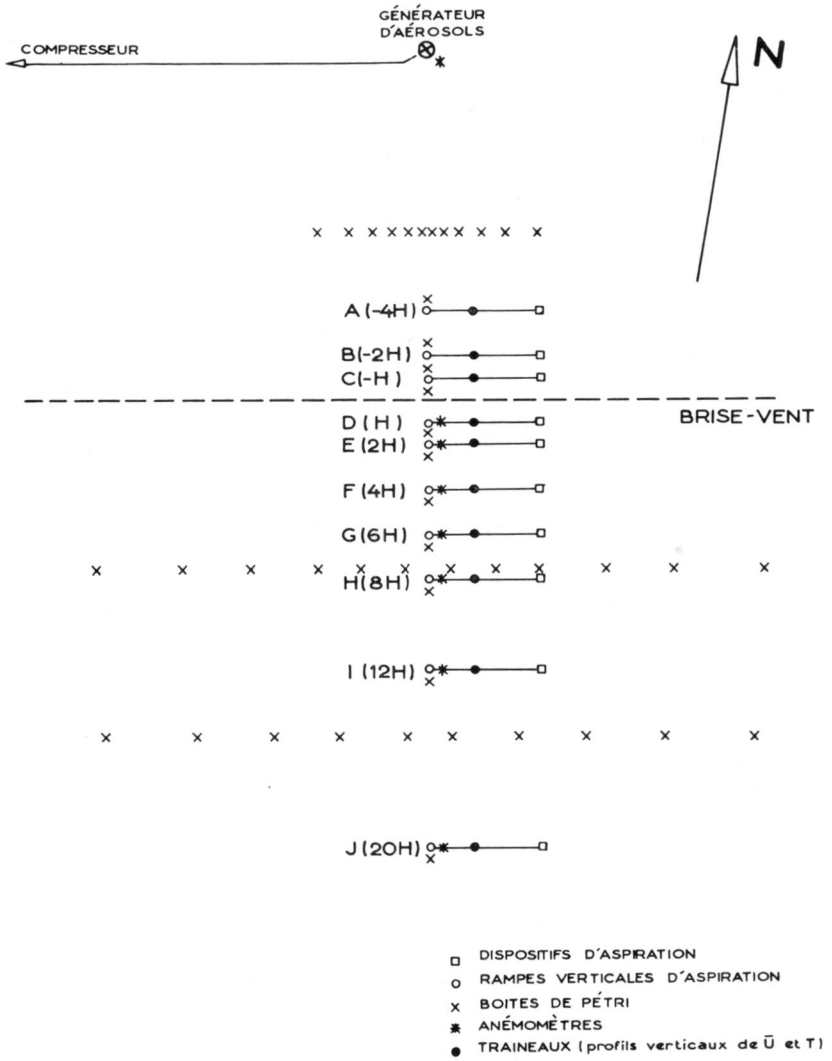



FIG. 3. — *Implantation du dispositif expérimental*

2. 31. *Dispositif d'émission et de prélèvement de l'aérosol.*

Le générateur d'aérosols est disposé à — 15,5 H sur l'axe de prélèvement. Dix rampes ververticales de prélèvement, supportant chacune cinq porte-filtres, sont réparties (3 en amont et 7 en aval du brise-vent, l'action des barrières se faisant sentir à plus grande distance en aval qu'en amont), aux distances — 4 H ; — 2 H ; — H ; H ; 2 H ; 4 H ; 6 H ; 8 H ; 12 H ; 20 H. Sur chaque rampe, les porte-filtres sont disposés aux cotes 0,2 H, 0,36 H, 0,62 H, 1,15 H, 2 H, constituant une échelle logarithmique entre 0,40 m et 2 m. Dix pompes volumétriques de débit unitaire voisin de 10 $m^3 \cdot h^{-1}$, préalablement étalonnées individuellement, assurent l'aspiration dans les dix rampes verticales par l'intermédiaire de tuyaux souples de longueur suffisante (5 H) pour ne

pas perturber la zone de prélèvement. Les filtres (Whatman GF/A) ont été spécialement choisis pour cette campagne, en raison de la reproductibilité de leur débit, lorsqu'une même dépression est appliquée à une de leurs faces.

2. 32. *Dispositif de mesure de la température de l'air et de la vitesse du vent.*

Sept anémomètres à contact (Lambrecht) sont placés en aval du brise-vent au niveau de chaque rampe de prélèvement, à une altitude de 0,75 H ; reliés à un ensemble de comptage électromécanique, ils sont destinés à fournir la courbe de réduction de la vitesse moyenne du vent par comparaison avec les valeurs obtenues en témoin à l'aide d'un huitième anémomètre placé à proximité du générateur.

Parallèlement à ces mesures, une exploration complète du champ de vitesse et de température est effectuée à l'aide de trois traineaux munis chacun de cinq anémomètres sensibles à cellule photoélectrique (Casella) et de cinq prises de température ventilées ; les capteurs sont placés aux altitudes : 0,25 H ; 0,5 H ; 1 H ; 1,5 H ; 2 H. Un traîneau fixe est placé en témoin tandis que les deux autres peuvent être déplacés parallèlement à l'axe du dispositif (le premier étant placé successivement à + 1, + 2, + 4 H et le second à + 6, + 8, + 12 H). Les anémomètres sont reliés à un ensemble de comptage électronique (Guyot, 1970 *b*) et les thermocouples des prises de températures sont connectés à un centralisateur de mesures (Vidar) qui transcrit sur bande perforées à raison d'une exploration toutes les 30 secondes (7 voies par seconde).

Enfin un anémomètre bivane (Climet) est disposé en un point de référence situé à 20 H, ses informations sont stockées à la cadence de trois par seconde sur bande perforée par un second ensemble d'acquisition de données (S.T.D.A.N.) (Hesling, 1969).

### 2. 4. — *Protocole expérimental*

Après une première exploration des profils de vitesse de vent et de température sur 20 minutes au top défini par l'horloge de l'ensemble d'acquisition de données Vidar, commencent l'enregistrement des mesures de vent et de température et l'émission du panache (l'aspiration dans les dix rampes ayant été déclenchée manuellement quelques secondes avant le top). L'essai dure également 20 minutes, après quoi les filtres sont collectés et placés aussitôt dans des flacons marqués afin d'éviter tout risque de transfert de pollution, tandis qu'une troisième exploration des profils de vent et de température est effectuée, pour obtenir une exploration complète de l'écoulement (Guyot et Samie, 1972).

Les filtres sont alors traités individuellement en laboratoire en vue de déterminer par fluorimétrie la quantité d'uranine présente sur chacun d'eux. Ils sont lavés par agitation dans 20 ml d'une solution tampon à pH 9,4 de chlorure d'ammonium (0,1 M) et d'ammoniaque (0,1 M). L'emploi de la solution de pH 9,4 et non d'eau distillée pure est dicté par le souci d'une plus grande reproductibilité de la fluorimétrie. En effet, sur la figure 4A représentant la variation de l'intensité de lumière fluorescée d'une solution en fonction de son pH, l'intérêt d'un pH élevé, dans la zone où la courbe présente un palier, apparaît clairement. La solution de lavage est filtrée, puis dosée à l'aide d'un fluorimètre Photovolt équipé d'un filtre primaire Kodak-Wratten n° 46 et d'un filtre secondaire Kodak-Wratten n° 15 qui correspondent aux spectres de lumière d'excitation et de réémission de l'uranine. La courbe d'étalonnage du fluorimètre est représentée par la figure 4B. La sensibilité de la méthode est largement suffisante puisqu'elle permet le dosage de quelques nanogrammes par échantillon, les quantités prélevées étant toujours de plusieurs centaines de fois plus fortes ; par ailleurs le « bruit de fond » en fluorescence du filtre GF/A représente dans les cas les plus défavorables 1 p. 100 seulement de la mesure, ce qui est de l'ordre de grandeur des imprécisions à tous les stades de l'essai (erreur sur le volume prélevé, sur le volume de solution tampon de lavage, sur le rendement de lavage des filtres GF/A, erreur du fluorimètre, approximation des calculs).

## III. — RÉSULTATS

### 3. 1. — *Granulométrie*

De même que pour le traitement des autres échantillons, chaque étage de l'impacteur d'Andersen est lavé par une petite quantité connue de solution tampon qui est dosée en masse.

Connaissant ainsi les quantités d'uranine présentes sur chaque étage d'impaction, on peut tracer le polygone des masses cumulées. La figure 5 montre que la répartition est sensiblement log-normale, le diamètre moyen s'établissant à un peu moins de 0,7 et l'écart-type géométrique à 1,5 (l'écart-type géométrique en masse est obtenu en effectuant le rapport des diamètres correspondant à 84,16 p. 100 et 50 p. 100).

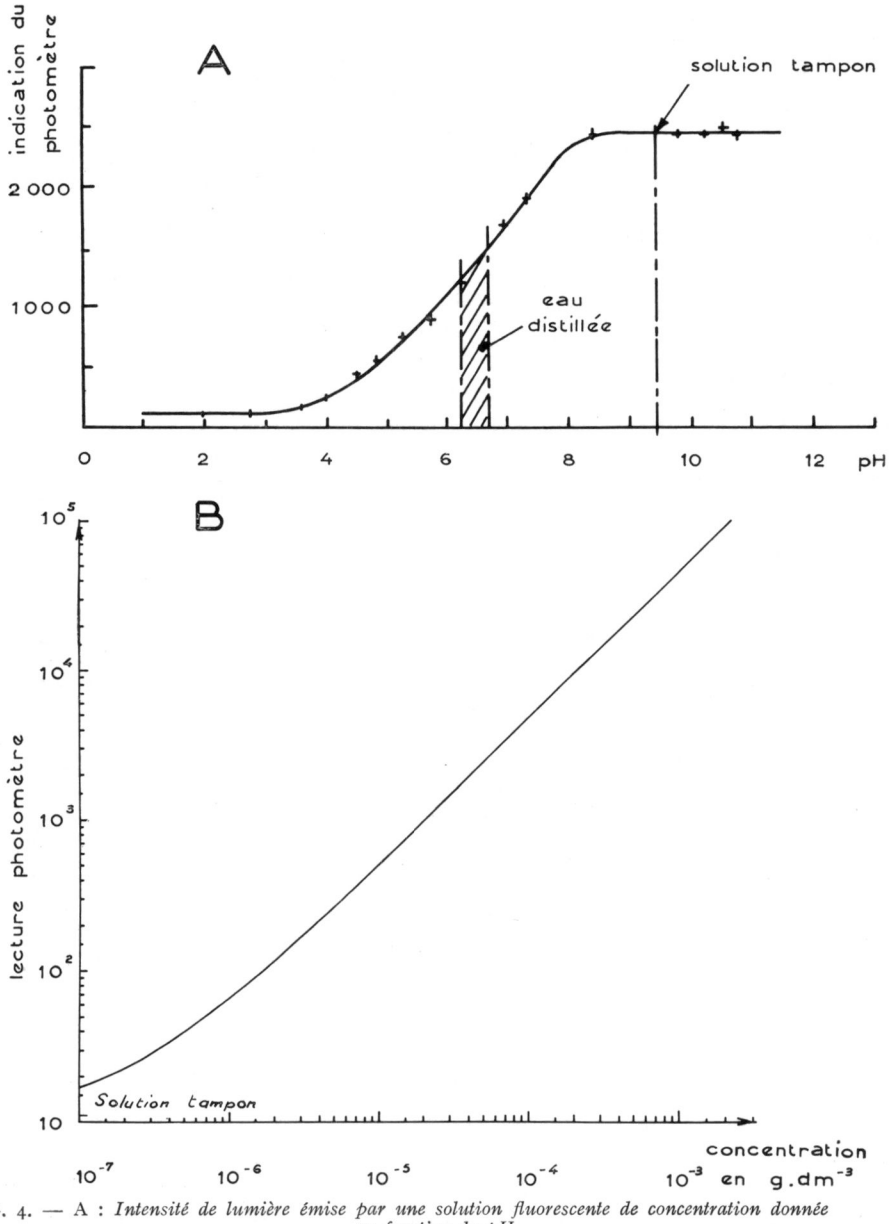



FIG. 4. — A : *Intensité de lumière émise par une solution fluorescente de concentration donnée en fonction du pH.*

B : *Étalonnage du fluorimètre Photovolt obtenu en utilisant des solutions d'uranine de pH = 9,4.*

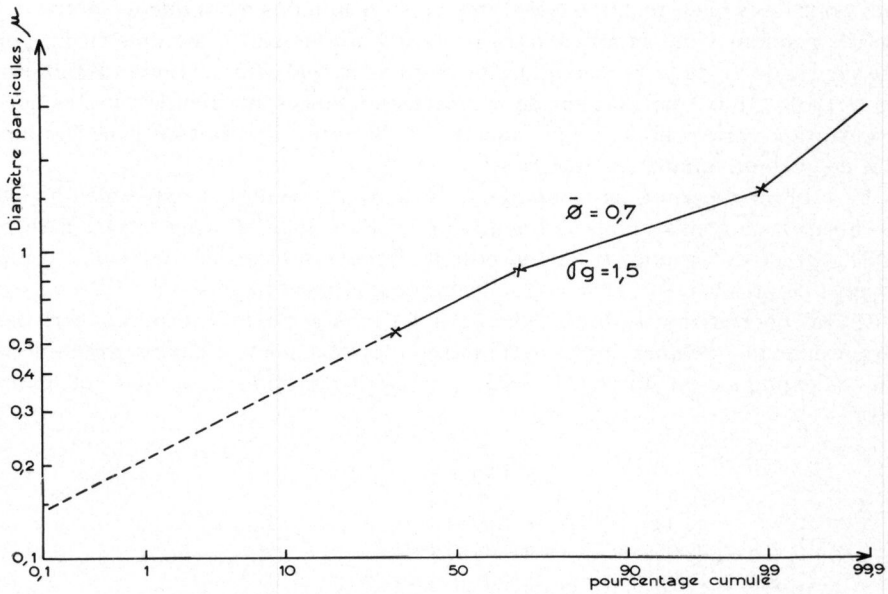



FIG. 5. — *Granulométrie de l'aérosol d'uranine. Polygone des masses cumulées*

### 3. 2. — *Comparaison entre les concentrations mesurées en l'absence de brise-vent et les concentrations théoriques d'après* PASQUILL

Considérons l'expérience n° 1, réalisée en l'absence de brise-vent. Les concentrations observées au niveau de prélèvement le plus bas (niveau 1 = 0, 40 m) peuvent être rapprochées des concentrations théoriques obtenues en appliquant le modèle de PASQUILL (1962) dans l'axe du panache, à proximité du sol. La forte insolation et la vitesse moyenne du vent ($\bar{u} = 6$ m · s$^{-1}$) permettent de classer le type de temps ce jour-là dans la catégorie C de PASQUILL. On en déduit les valeurs des coefficients de dispersion horizontale ($\sigma y$) et verticale ($\sigma z$) aux abscisses correspondant aux points de prélèvement.

Les valeurs de ces coefficients étant connues, on peut résoudre l'équation de diffusion donnant la concentration :

$$\chi_{(x,y,z,H)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\,\sigma_z\,\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \quad (1)$$

qui, dans l'axe du panache et au voisinage du sol se simplifie et prend la forme

$$\chi_{(x,0,0,H)} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\,\sigma_z\,\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)$$

H étant le niveau effectif d'émission (ici 0,50 m. ) compte tenu de la vitesse d'éjection du polluant, et Q étant le débit d'émission en g · s$^{-1}$. Le modèle de PASQUILL est

établi pour des prélèvements d'une durée de trois minutes alors que les nôtres sont effectués pendant vingt minutes, or la concentration moyenne mesurée en un point varie avec la durée du prélèvement. Cette loi est assez mal connue, toutefois une étude récente (HINO, 1968) portant sur de nombreuses données antérieures montre que la concentration varie comme la puissance 1/2 de la durée d'aspiration dans la gamme allant de quelques minutes à quelques heures.

Le tableau I permet de comparer les valeurs théoriques et expérimentales des concentrations en trois points différents. Ce tableau donne la concentration théorique déduite de la formule (1), la concentration théorique corrigée en tenant compte du temps de prélèvement, et la concentration expérimentale observée. La comparaison des valeurs théoriques obtenues en J1 et J'1 montre par ailleurs qu'un écart angulaire présumé de quelques degrés entre l'axe de prélèvement et l'axe moyen du vent suffit à expliquer la différence entre les concentrations théoriques et expérimentales.

TABLEAU I

*Comparaison des valeurs expérimentales observées et des valeurs théoriques déduites de la formule* (1)

| Point de prélèvement | $x$ (m) | $y$ (m) | Écart angulaire degrés | $z$ (m) | $\chi$ théorique ($10^{-4}$ g . m$^{-3}$) | $\chi$ théorique ($10^{-4}$ g . m$^{-3}$) | $\chi$ expérimental ($10^{-4}$ g . m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 1 ..... | 23 | 0 | 0 | 0,4 | 1, 32 | 0,512 | 0,182 |
| J 1 ..... | 71 | 0 | 0 | 0,4 | 0,137 | 0,053 | 0,021 |
| J' 1 ..... | 71 | 10 | 8 | 0,4 | 0,056 | 0,022 | |

### 3. 3. — *Déformations du panache engendrées par les brise-vent*

Connaissant la quantité d'uranine émise et la durée d'émission, la quantité d'uranine présente sur chaque filtre et le volume d'air filtré, il est facile de calculer la concentration moyenne $\chi/Q$ en ce point correspondant à un débit unitaire de rejet. Si $\chi$ est la concentration en g · m$^{-3}$ et Q le débit de la source en g · s$^{-1}$, $\chi/Q$ est exprimé en s · m$^{-3}$.

Les figures 6A, 6 B, 6 C représentent les isoplèthes de $\chi/Q$ correspondant aux essais n° 1, 2, 4 choisis à titre d'exemple. Les figures 7 et 8 indiquent les profils verticaux de $\chi/Q$ correspondant aux mêmes essais. Les isoplèthes de $\chi/Q$ permettent une représentation relativement claire d'une section du panache dans un plan vertical. Ce plan vertical ne coïncide pas toujours exactement avec l'axe du panache, car la direction moyenne du vent n'est pas rigoureusement constante, alors que l'axe des prélèvements est fixe. Il ne faut donc pas comparer les valeurs absolues de $\chi/Q$ d'une expérience à l'autre (sauf dans le cas des essais n° 1 et 2 qui ne sont séparés que par un très faible intervalle de temps et se sont déroulés dans des conditions micrométéorologiques identiques), mais seulement les gradients verticaux et horizontaux, en d'autres termes la forme des panaches.

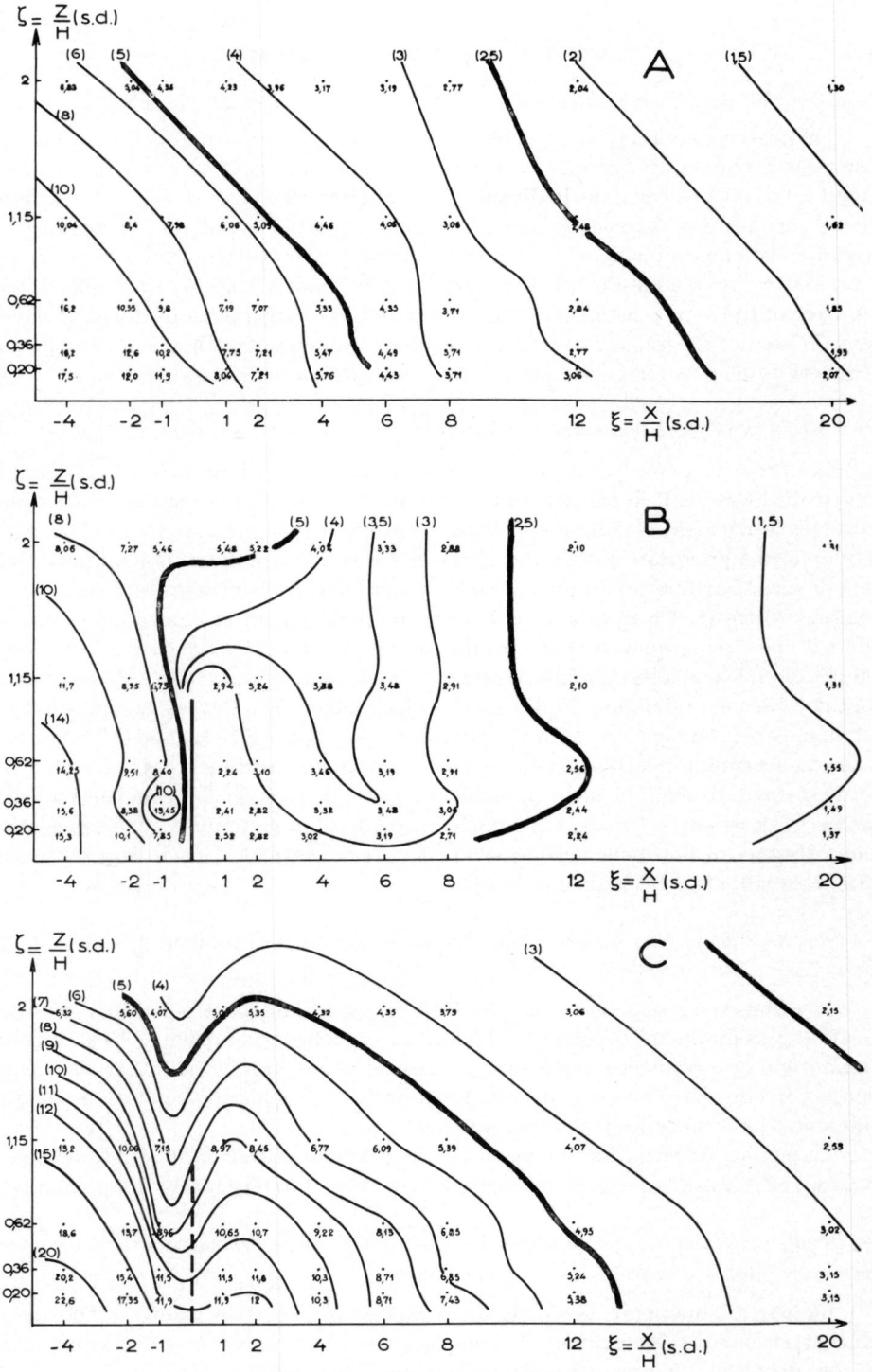



FIG. 6. — *Lignes iso-concentration*

Les concentrations entre parenthèses correspondent à une émission de 1 $g \cdot s^{-1}$ et sont exprimées en $10^{-4}$ $s \cdot m^{-3}$

A : sans brise-vent (essai n° 1)
B : en présence du brise-vent imperméable (essai n° 2)
C : en présence du brise-vent perméable (K = 1,43) (essai n° 3)

— *Isoplèthes de $\chi/Q$ en l'absence de brise-vent* (essais n° 1 et 11, fig. 6A).

On observe, notamment au début de la zone étudiée, quelques déformations que l'on peut attribuer au fait que le champ expérimental planté de fétuque, homogène quant à lui, est précédé dans la direction du vent par un champ de blé, dont la lisière arrive jusqu'à une dizaine de mètres du générateur d'aérosol. Le changement de rugosité est vraisemblablement responsable de ces légères irrégularités que l'on voit s'amortir au fur et à mesure que le panache pénètre dans le champ de fétuque. Malgré ces irrégularités, on constate l'existence de gradients horizontaux décroissant dans le sens du vent et de gradients verticaux réguliers, toujours dans le même sens, les concentrations les plus fortes se trouvant bien entendu au niveau du sol.

— *Isoplèthes de $\chi/Q$ en présence d'un brise-vent imperméable* (essais n° 2, 6, 7, fig. 6B).

La forme du panache est très perturbée au passage de l'obstacle. On observe en amont du brise-vent de très forts gradients horizontaux, les concentrations décroissant très rapidement en fonction de la distance, et on constate la présence d'un maximum relatif à proximité du pied de l'obstacle. En aval, les gradients horizontaux changent de sens à partir d'un certain point, un maximum relatif se produisant à une distance comprise entre H et 6 H suivant la hauteur de prélèvement et l'expérience. Mais les effets les plus remarquables sont sans doute ceux que l'on observe dans le plan vertical. En effet, le panache étant décollé du sol, les concentrations dans les basses couches sont notablement affaiblies, tandis que dans les couches plus élevées, la concentration est augmentée. De plus, un certain rabattement se produit entre H et 6 H ; il est responsable du maximum relatif signalé plus haut. La diffusion turbulente dans le plan vertical est donc considérablement modifiée par suite du mélange des couches d'air inférieures et supérieures. On constate que les isoplèthes tendent, après homogénéisation, à une distance de l'obstacle voisine de 8 H, à devenir verticales, le gradient s'annulant dans la couche étudiée (épaisseur de 2 H).

— *Isoplèthes de $\chi/Q$ en présence d'un brise-vent perméable* (essais n° 3, 4, 5, 8, 9, 10, fig. 6 C).

Les effets sont beaucoup moins évidents, on peut seulement remarquer une surélévation plus ou moins importante de l'axe du panache, accompagnée d'une certaine diminution des gradients verticaux de concentration sauf dans le cas de l'expérience 3 où l'on observe l'effet inverse. Deux grilles de coefficient de perte de charges différentes ont fourni des résultats similaires.

La gamme de variation du coefficient de perte de charge était insuffisante pour avoir un effet sensible sur la déformation du panache et la répartition des polluants.

— *Profils verticaux de $\chi/Q$ en l'absence de brise-vent et en présence d'un brise-vent imperméable* (essais n° 1 et 2).

La partie supérieure de la figure 7 représente les trois profils verticaux de concentration mesurés en amont de l'emplacement du brise-vent, la partie inférieure, les sept profils mesurés en aval.

En l'absence de brise-vent, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source, on remarque comme précédemment un amortissement des irrégularités dans les basses couches, dues aux variations de rugosité du sol, et une diminution progressive du gradient vertical qui demeure toujours négatif.

En présence du brise-vent imperméable et dans des conditions micrométéorologiques très voisines, on peut faire les remarques suivantes : en amont, existent une réduction du gradient vertical dès le point d'abscisse — H, et une zone de concentration élevée au pied du brise-vent, tandis qu'en aval apparaît une inversion du gradient

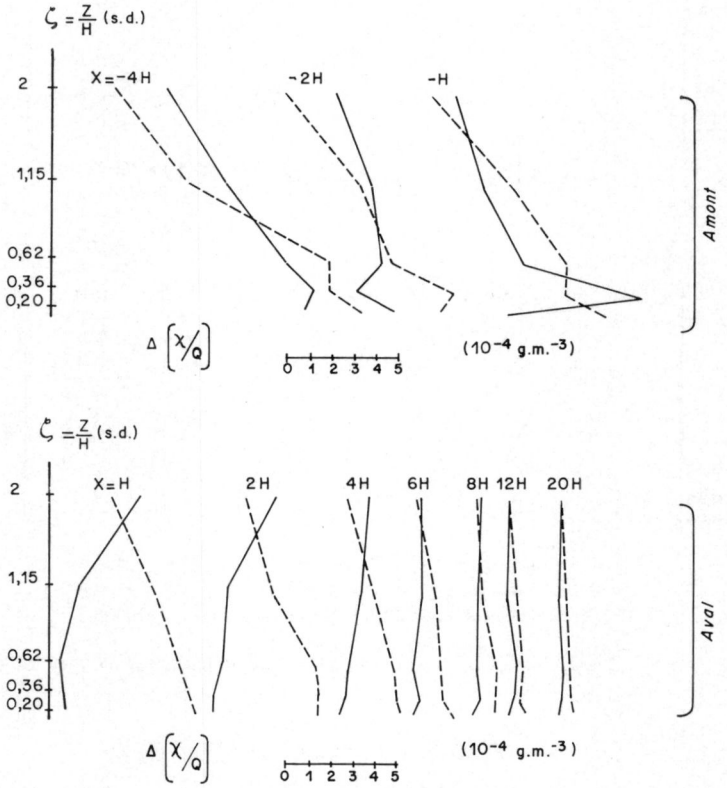



FIG. 7. — *Comparaison des profils de concentration obtenus*
— — — — : sans brise-vent (essai n° 1)
———— : en présence d'un brise-vent imperméable (essai n° 2)

vertical de concentration jusqu'à l'abscisse 6 H environ, le gradient tendant ensuite à s'annuler. On constate bien, comme précédemment, que les basses couches, jusqu'à environ deux fois la hauteur du brise-vent, ont été épurées au détriment des couches plus élevées.

— *Profils verticaux de $\chi/Q$ en l'absence de brise-vent et en présence d'un brise-vent perméable* (essais n° 1 et 3).

La figure 8 illustre la divergence des résultats obtenus avec les brise-vent perméables. Elle montre que lors de l'expérience n° 3, le brise-vent perméable n'a pas apporté d'épuration des basses couches mais au contraire augmenté le gradient de concentration.

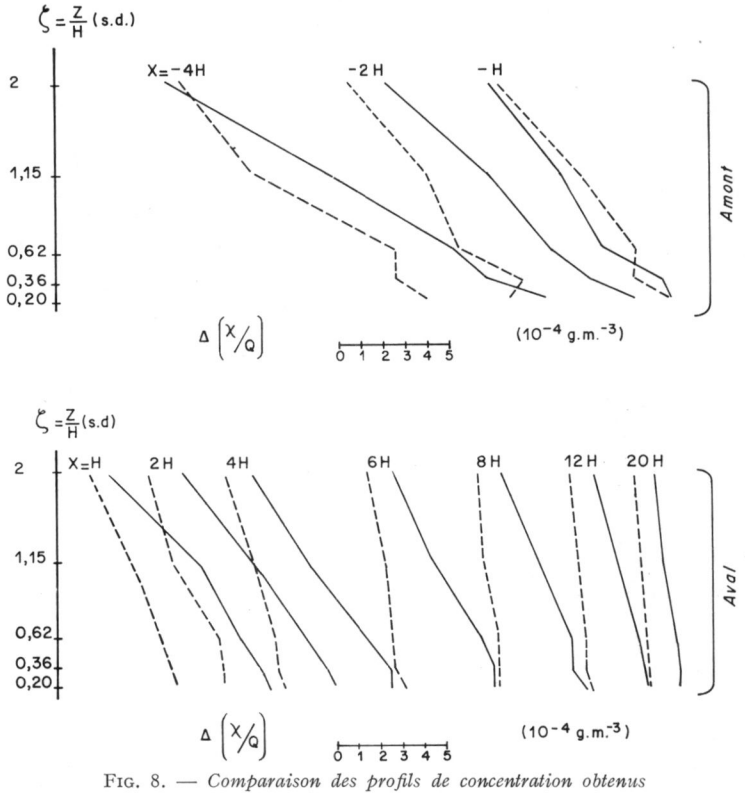



FIG. 8. — *Comparaison des profils de concentration obtenus*
— — — — : sans brise-vent (essai n° 1)
———— : en présence d'un brise-vent perméable (essai n° 3) (K = 1,43)

### 3. 4. — *Résultats des mesures météorologiques*

Les figures 2A et 2B représentent les isoplèthes de vitesse du vent au voisinage du brise-vent imperméable et du brise-vent perméable (K = 2,55) ; elles sont exprimées en valeurs relatives par rapport à la vitesse en témoin à 2 m du sol et se rapportent aux essais n$^{os}$ 7 et 8. Elles sont à rapprocher des figures 6 B et 6 C qui donnent les isoplèthes de concentration pour les deux types de brise-vent.

Les figures 9 A et 9 B donnent pour les mêmes brise-vent, à différentes altitudes, les courbes de réduction du vent exprimées en valeurs relatives par rapport à la vitesse en témoin à la même hauteur. Dans le cas du brise-vent imperméable, la valeur absolue de la vitesse a seule été prise en considération.

Les figures 10 A et 10 B représentent les isoplèthes des écarts de température par rapport au témoin à 2 m pour les mêmes brise-vent que précédemment. Ces courbes sont à rapprocher des figures 2 A et 2 B, elles mettent en évidence l'existence d'une relation étroite entre la réduction de la vitesse du vent et l'élévation de la température de l'air.

Ces séries de courbes sont représentatives de l'ensemble des essais, les conditions météorologiques étant relativement reproductibles par temps de mistral.

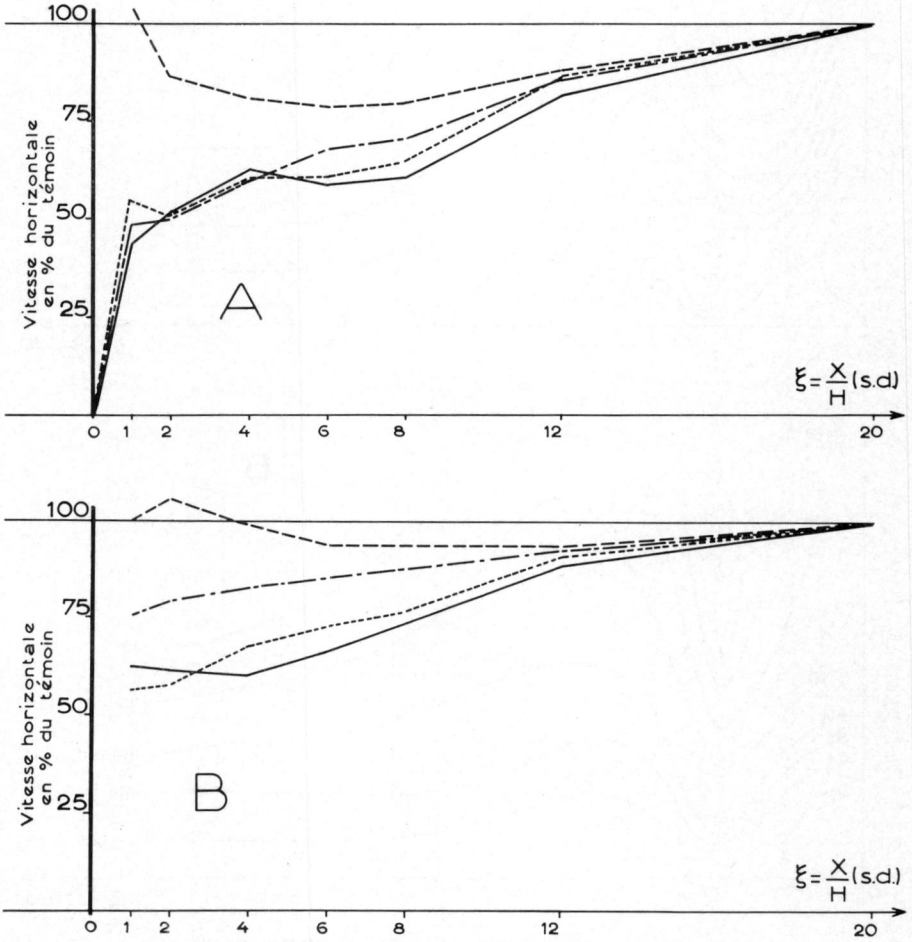



FIG. 9. — *Courbes de réduction de vitesse horizontale du vent*

A : cas du brise-vent imperméable
B : cas du brise-vent perméable (K = 2,55)

——— Z = 1,50 H
—·—·— Z = 1,00 H
---------- Z = 0,50 H
———— Z = 0,25 H

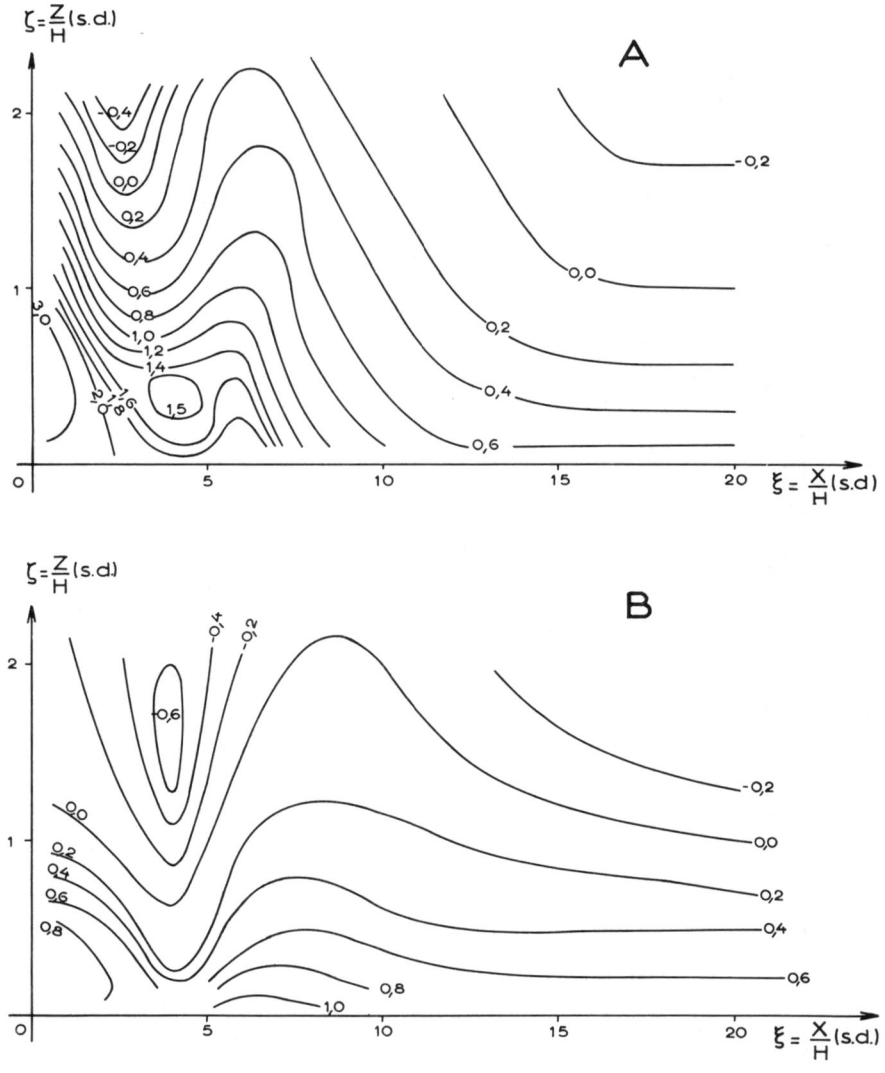



FIG. 10. — *Iso-thermes des écarts de température en degrés centigrades par rapport au témoin à l'abscisse 20 H et à la cote H*
A : cas du brise-vent imperméable
B : cas du brise-vent perméable (K = 2,55)

## IV. — DISCUSSION

### 4. 1. — *Influence des caractéristiques du brise-vent et de la rugosité de la région*

Les résultats obtenus, tant en ce qui concerne les niveaux de pollution que la réduction du vent, montrent, au cours de cette campagne expérimentale, que les brise-vent perméables à faible cœfficient de perte de charge paraissent très peu efficaces,

voire parfois totalement inefficaces, alors que les brise-vent imperméables sembleraient avoir un effet plus marqué.

Ce résultat paraît *a priori* surprenant car d'après de nombreux auteurs, le maximum d'efficacité aérodynamique d'un brise-vent mince correspondrait à une porosité de l'ordre de 50 p. 100 (O.M.M., 1964). Cependant des expériences effectuées à Montfavet (Avignon) et à Perpignan, dans le but de rechercher la valeur optimale du coefficient de perte de charge des brise-vent, ont conduit à des résultats en contradiction avec ceux de la littérature, et également avec ceux obtenus à la Minière dans la région parisienne et à Gotheron (Valence) sur des plateaux dégagés. Tandis que sur ces deux derniers sites, le brise-vent le plus efficace continuait à être celui doté d'un coefficient de perte de charge variant entre 1,55 et 2,85 (porosité géométrique voisine de 50 p. 100), pour les deux premières régions, par contre, le brise-vent le plus efficace s'avérait être le brise-vent imperméable ou très peu perméable (fig. 11). La courbe représentant l'évolution de l'efficacité S du brise-vent (produit de la réduction moyenne du vent par la longueur de la zone protégée) en fonction de son coefficient de perte de charge K ne passe plus par un maximum. Ceci pourrait s'expliquer par la valeur différente des taux de turbulence dans des zones très dégagées comme La Minière (Bassin parisien) et Gotheron (région de Valence) et d'autre part dans des zones de cultures maraîchères très cloisonnées comme Avignon et Perpignan.

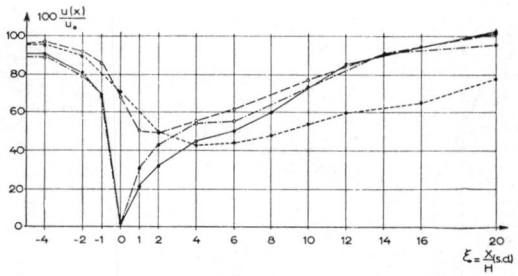



FIG. 11. — *Courbes de réduction de vitesse horizontale du vent à mi-hauteur du brise-vent en zone dégagée* (région parisienne) *et en zone perturbée* (vallée du Rhône)

———— brise-vent imperméable
- - - - - - - - brise-vent perméable (K = 2,55) } région parisienne
— — — — brise-vent imperméable
— — — — brise-vent perméable (K = 2,55) } vallée du Rhône

La rugosité, à l'échelle de la région, joue en effet un rôle important : des essais, réalisés en soufflerie sur un modèle réduit au 1/40, ont montré que le brise-vent est d'autant plus efficace que la rugosité du plan est plus faible. C'est ainsi que pour un brise-vent relativement peu poreux (K = 2,8), l'étendue de la zone perturbée passe de 21 H à 35 H quand le paramètre de rugosité passe de 0,50 à 0,05 mm ; elle passe de 18 H à 36 H dans les mêmes conditions pour un brise-vent très perméable (K = 1,43) (GUYOT et SAMIE, 1972).

Cette influence de la rugosité du plan avait déjà été mise en évidence par JENSEN (1954) mais ses essais ne furent pas poussés suffisamment loin (très forte rugosité) pour faire disparaître l'optimum d'efficacité génèralement admis. Nos premiers essais de dispersion de polluants ayant eu lieu à Montfavet, il n'est pas surprenant, compte

tenu de ce qui précède, que l'épuration maximale ait été constatée lors de l'utilisation de brise-vent imperméable mais il convient d'insister sur le fait que les résultats pourraient être très différents dans une autre région.

### 4. 2. — *Influence des conditions micrométéorologiques*

Les essais de diffusion présentés ici ayant été réalisés par temps de mistral, il n'est pas possible d'extrapoler les résultats obtenus à d'autres types de temps. Néanmoins, on a pu observer dans des conditions expérimentales différentes que l'efficacité des brise-vent dépendait de l'état de stabilité de l'atmosphère. Les effets correspondants en ce qui concerne la diffusion turbulente sont donc prévisibles, sous réserve de vérification expérimentale ultérieure.

La stabilité thermique des basses couches peut se représenter par le nombre de RICHARDSON ou la longueur de MONIN OBUKHOV, ou encore d'une manière plus approximative, mais suffisante dans le cas qui nous intéresse, par le rapport de stabilité $S_r$ ($S_r = \frac{\Delta T}{\bar{u}^2}$, $\Delta T$ étant la différence de température entre deux niveaux $z_1$ et $z_3$ et $\bar{u}$ la vitesse moyenne au niveau intermédiaire $z_2$). La figure 12 indique l'évolution de la protection exercée par un brise-vent en fonction de ce rapport de stabilité ;

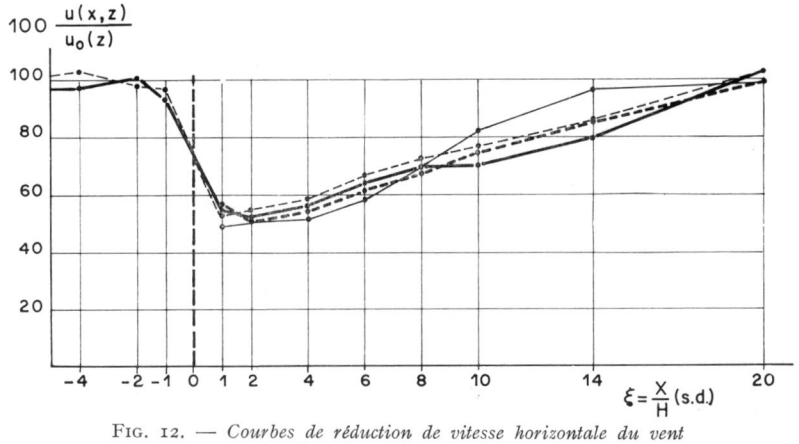



FIG. 12. — *Courbes de réduction de vitesse horizontale du vent en fonction du rapport de stabilité $S_r$*

(brise-vent perméable K = 2,55)

| | | |
|---|---|---|
| ——— | 2-10-69 | $S_r$ = 0,006 |
| - - - - - - - - - | 28-08-69 | $S_r$ = 0,009 |
| ——— | 27-08-69 | $S_r$ = 0,024 |
| ---------- | 26-08-69 | $S_r$ = 0,012 |

plus l'air est instable, plus l'efficacité du brise-vent diminue. C'est ainsi que l'étendue de la zone protégée tombe de 14 H à 1 H, 12 H et 10 H quand $S_r$ passe de 0,006 à 0,009, 0,012 et 0,024. Ceci peut s'expliquer aisément : le brise-vent provoque un mouvement ascendant du flux d'air incident. Si l'air est instable, une partie plus importante du flux d'air incident contourne l'obstacle, tout se passant comme si la porosité du brise-vent avait diminué. La zone protégée sera alors plus courte. Ce phénomène est fondamental et permet d'expliquer en grande partie les divergences constatées

entre les résultats obtenus en soufflerie et dans les conditions naturelles. En effet, bien que les conditions de similitude du point de vue aérodynamique aient été respectées (nombre de REYNOLDS turbulent), les longueurs de la zone d'action des brise-vent trouvées en soufflerie s'avéraient être le double de celles mesurées dans les conditions naturelles ; les seules différences importantes entre le modèle et la réalité se situaient dans l'absence de gradient thermique vertical et l'existence d'un spectre de turbulence plus étroit en soufflerie que dans la nature.

Par ailleurs, l'extension de la zone protégée par un brise-vent croît avec la vitesse du vent mais il est difficile de séparer cette influence de celle de la stabilité thermique puisque le gradient vertical de température diminue lorsque la vitesse du vent augmente, les deux actions se conjugant pour réduire le rapport de stabilité.

## V. — CONCLUSIONS

Cette première expérience, réalisée à Montfavet en mai 1970, a permis de confirmer certaines hypothèses de travail nées de la confrontation des travaux effectués sur l'aérodynamique des brise-vent et des connaissances actuelles sur la diffusion des polluants.

Dans les conditions où les mesures ont été effectuées (vent fort à spectre riche en basses fréquences, gradient thermique relativement faible), il a été constaté que les brise-vent perméables à faible cœfficient de perte de charge semblaient n'avoir que peu d'effet sur la diffusion turbulente, par contre les brise-vent imperméables auraient un effet beaucoup plus marqué ; ils favoriseraient la dispersion des polluants lorsque ceux-ci sont émis au sol en avant de l'obstacle. Il faut également remarquer que cet effet du brise-vent est d'autant plus marqué que l'air est stable ; ce qui est une heureuse coïncidence car ces conditions météorologiques sont les plus mauvaises en ce qui concerne la pollution atmosphérique.

Les caractéritiques du spectre de turbulence du vent semblent jouer un rôle prépondérant dans le mécanisme d'action des brise-vent ; il s'en suit que les conclusions risquent de différer selon les valeurs de la rugosité du paysage et les conditions de stabilité thermique de l'air rencontrées au cours des différentes expérimentations. Les résultats de cette première expérience conduite dans des conditions extrêmes ne sauraient être généralisés ; il apparaît nécessaire de poursuivre cette étude en faisant varier les paramètres géographiques (régions plus ou moins dégagées) et climatiques (différents régimes de vent et gradients thermiques), ainsi que les caractéristiques de perte de charge des brise-vent perméables.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*


## SUMMARY

### LOCAL EFFECT OF A THIN WINDBREAK ON DISPERSION OF POLLUTANTS EMITTED AT GROUND LEVEL

Experimental tests have been performed in the field to investigate the effects on a number of thin windbreaks of the turbulent diffusion of non-sedimental pollutants consisting of gas or particles emitted at ground level.

During the test runs, fluorescent submicrons were emitted for 20 minutes from a pinpoint source located upstream of an artificial windbreak, the porosity and pressure drop of which had been ascertained. Concentration at various points in space were determined by fluorometric analysis of the dusts taken from a system comprising 50 filtres located at five different levels.

The ranges of speeds and temperatures were concomitantly tested to determine the characteristics of flow.

The upshot is that, under the experimental conditions of the tests, very pervious windbreaks have virtually no effect on diffusion of the particles. Whereas, if impervious, they cause the air to rise sharply with the cloud of particles, thereby bringing about the heaviest concentration at a height where pollutants are no longer harmful.

These results were obtained in a strong wind, the vertical gradient of temperature being fully adiabatic and on rough terrain. Apparently, they cannot be extended to areas where different temperature conditions and mechanical turbulence effects are observed, this requiring testing accordingly.

## ZUSAMMENFASSUNG

### OERTLICHE WIRKUNG EINES DUNNEN WINDSCHÜTZES AUF DIE VERTEILUNG DER SCHADSTOFFE AUF BODENEBENE

Mit dem Zweck, die Wirkungen von verschiedenen, dünnen Windschirmen auf die wirbelnde Diffusion der auf Bodenebene entwickelten strömenden Gas- oder nicht niederschlagsfähigen, teilchenförmigen Schadstoffen zu untersuchen, wurden auf dem Felde Forschungen durchgeführt. Im Laufe jedes Versuches wurden während 20 Minuten fluoresizerende submicrone Teilchen gesendet, die aus einer auf dem Boden, oberhalb eines künstlichen Windschirmes mit bekannter Porosität und Druckverlust, gelagerten Quelle stammten. Die Konzentrationen in verschiedenen Punkten des Raumes wurden mittels fluorimetrischer Analyse der von Filtern entnommenen Staubmengen festgestellt.

Das Netz der Probenahmen bestand aus 50 Filtern, die auf 5 verschiedene Ebenen verteilt waren. Gleichzeitig wird das Geschwindigkeits - und Temperaturfeld erforscht, mit dem Ziel, die Charakteristiken des Ablaufes zu bestimmen.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den obenbeschriebenen Versuchsbedingungen, die sehr durchlässigen Windschirme praktisch keine Wirkung auf die Verteilung der Teilchen haben. Im Gegensatz hierzu, treiben die undurchlässigen Windschirme, indem sie ein mechanisches brutales Aufsteigen der Luft verursachen, die Staubwolke hoch, so dass die Konzentrationsmaxima zu einer Höhe übertragen werden, wo die Schadstoffe nicht mehr gefährlich sind. Diese Ergebnisse wurden für einen mittel mässig starken Wind, bei einem senkrechten überradiabatischen Temperaturgradient und an Hand einer Anpflanzung in einer Zone mit starker Rauhigkeit erhalten. Allem Anschein nach gelten sie nich für andere Gebiete, die durch abweichende mechanische und thermische Bedingungen charakterisiert sind und die besondere Versuche erfordern.

## РЕЗЮМЕ

### Локальный эффект тонкой ветроломной полосы на дисперсию загрязнителей выделенных на уровне почвы.

И. БЕЛО, К. КАПО, Г. ГЮЙЙО, К. САМИ.

Чтобы изучить влияние разных тонких ветроломных полос на турбулентную дисперсию загрязняющих газов, или неосадочных загрязняющих частиц выделенных на уровне почвы, были поставлены полевые опыты. В каждом опыте пунктуальный источник помещенный на земле с надветренной стороны искуственного ветролома с известными порозностью и утечкой, выделял в течении двадцати минут суб-микронные

флуоресцирующие частички. Концентрация загрязнителей определялась в разных пунктах пространства с помощью флуорометрического анализа пыли осевшей на фильтрах, сеть которых, состоявшая из 50-ти штук, была расположена на 5-ти различных уровнях. В то же время, чтобы охарактеризовать поток, производились измерения температур и скоростей. Результаты показывают что проницаемые ветроломы не оказывают никакого действия на диффузию частичек в условиях опыта. И, напротив, ветроломы непроницаемые, создающие резкое механическое восхождение воздуха, увлекают ввысь облако частичек, перенося максимальные их концентрации на высоты, на которых загрязнители уже больше не вредят. Результаты эти получены были при сравнительно сильном ветре, вертикальном нададиабатическом градиенте температуры, в зоне сильной бугорчатости. Их, как кажется, нельзя распространить на другие зоны, характеризующиеся иными условиями механической и термической турбулентности, и которые потребуют особых опытов.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ANDERSEN A. A., 1966. A sampler for respiratory health hazard-assessment. *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **27**, 160-165.

BAGNOLD R. A., 1960. The re-entrainment of settled dusts. *Int. J. Air Poll.*, **2**, 357.

BASOV G. P., 1948. Résultats de 50 années d'études sur le rôle hydrologique des forêts dans la steppe de pierre. *Potshvovedenie*, **8**, 475-484.

BUSINGER J. A., 1965. Eddy diffusion and settling speed in blown snow. *J. Geophys. Res.*, **70** (14), 3307.

CHAMBERLAIN A. C., 1953. Aspects of travel and deposition of aerosol and vapor clouds. Rapport anglais. *Atomic Energy Authority*, AERE HP/R 1261, 29.

CORN M. et STEIN F., 1964. Mechanisms of dust redispersion in surface contamination. In : *Surface contamination*, Gatlinburg, june 8-12, Pergamon Oxford, 45-54.

GUYOT G., 1970. Les effets des brise-vent en matière plastique. *IV^e Colloque International sur les plastiques en agriculture*, Paris, 6-11 juin, 293-303.

GUYOT G., 1970 *b*. Ensembles de comptages anémométriques destinés à des études écologiques dans *Techniques d'Étude des facteurs physiques de la Biosphère*. I. N. R. A., Paris, 397-408.

GUYOT G., SAMIE C., 1972. Efficacité aérodynamique d'un brise-vent. *Agric. Meteorol.*, (soumis à publication).

HALISTSKY J., 1963. Gaz diffusion near buildings. *New York University, Dept. Meteorol. and Oceanog.*, Rep. 63-3, 119.

HESLING M., 1969. Système de transcription de données alpha-numériques. *Bulletin d'Instrumentation Nucléaire*, **36**, 5-13.

HINO M., 1968. Maximum ground level concentration and sampling time. *Atm. Env.*, **2**, 149-165.

JENSEN M., 1954. *Shelter effect*. Copenhagen, 264 p.

MAY K. R., 1964. Calibration of a modified Andersen Bacterial Aerosol Sampler. *Appl. Microbiol.*, **12**, 37.

MUNN R. E. and COLE A. F. W., 1967. Turbulence and diffusion in the wake of a building. *Atm. Env.*, **1**, 33-43.

NAGELI W., 1953. Untersuchungen über die Winderhältnisse im Bereich von Schilfrohrwänden. *Ann. Inst. Rech. Forest.*, **29**, 213-266.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, 1964. *Windbreaks and Shelterbelts*. Technical Note n° 59, Genève, O. M. M., 188 p.

PASQUILL, 1962. *Atmospheric diffusion*. Van Nostrand, Princeton, 297 p.

SUTTON O. G., 1953. *Micrometeorology*. Mac Graw-Hill Book, New York, 333 p.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (2), 145-163.

# MÉTHODE D'APPRÉCIATION ET DE CLASSEMENT DES TERRES DE CAUSSE EN VUE DU DÉFRICHEMENT

## Un exemple sur les causses sud-aveyron [1]

G. CALLOT

*Service d'Étude des Sols, I. N. R. A.,*
*34 - Montpellier*

## RÉSUMÉ

Dans le cadre de la mise en valeur des Terres de Causses, l'auteur a effectué un classement des sols en vue de leur aptitude au défrichement. Ce classement tient compte des paramètres susceptibles d'intervenir : sur l'aspect technique guidant la possibilité d'intervention des engins (topographie, fréquence des affleurements rocheux), sur l'aspect agronomique (pierrosité, profondeur et nature du sol), enfin sur les données relatives à l'environnement (couvert végétal, ancien parcellaire, facilité d'accès, éloignement).

L'étude pédologique préalable à l'établissement de ce classement, montre en particulier, les relations qui existent entre les différents paramètres. Cette étude est également complétée par une carte thématique renseignant l'utilisateur sur l'aptitude des terres au défrichement.

Du point de vue cartographique, la représentation de type synthétique adopté pour le classement des divers secteurs d'aménagement est complétée d'une codification alpha-numérique renseignant sur les données susceptibles d'intervenir sur le coût et la rentabilité des travaux.

Enfin, un exemple d'aménagement envisage l'aspect économique du défrichement dans le contexte agricole de la région.

## INTRODUCTION

Sur les terres de Causse, de nombreuses parcelles autrefois cultivées ont été abandonnées et laissées en friche par suite des difficultés de travail (parcelles trop petites, trop éloignées du village, présence d'affleurements rocheux, etc.). Aujourd'hui, avec des moyens puissants, (bulldozers équipés de griffes dessoucheuses), certains facteurs limitants comme les affleurements rocheux, les murettes ou les irrégularités de terrains peuvent être supprimés et offrir ainsi à l'agriculteur, de nouvelles possibilités culturales.

[1] L'étude pédologique du canton de Bozouls (G. Callot, 1971), qui a servi de principale référence à cette publication, a été réalisée à la demande de la D. D. A. de Rodez.

Quelques exemples de défrichement réalisés sur le Causse du Comtal, au nord de Rodez et sur le Causse de Villeneuve, au nord de Villefranche-de-Rouergue, ont donné déjà des résultats spectaculaires. Toutefois, ceux-ci ont souvent été effectués dans des situations particulières. Aussi, avant d'étendre systématiquement cette technique sur l'ensemble des terres de Causse, il est nécessaire de localiser et de classer les différents secteurs pour mieux prévoir les possibilités, le coût et l'intérêt de ces défrichements.

Dans cette région, le substratum calcaire donne naissance à des sols dont les caractéristiques agronomiques sont assez voisines (faible profondeur, forte pierrosité, caractéristiques chimiques, etc.). Aussi, les critères de classement des terres habituellement retenus ont dû être précisés, complétés, adaptés dans ce cas particulier.

L'étude pédologique préalable, tout en renseignant sur les propriétés agronomiques des sols, apporte des informations précieuses sur les relations qui existent entre les différents critères de classement et souligne en particulier l'intérêt qu'il faut porter sur la nature de certains critères (aspect qualitatif).

## I. — CONNAISSANCE DU MILIEU NATUREL

### 1. — *Le cadre régional*

Le Causse du Comtal et le Causse de Lanhac occupent la plus grande partie de la région étudiée, 28 000 ha environ. Ils font partie des Grands Causses situés presque en totalité dans le département de l'Aveyron. Ces plateaux, d'une altitude moyenne de l'ordre de 600 m, montrent une morphologie de type karstique avec pentes abruptes et dolines fréquentes soulignant souvent le tracé de réseaux hydrographiques souterrains.

Cette région, sud du Massif central est soumise à un *climat* de transition entre les climats océaniques, continentaux et méditerranéens. Il en résulte une grande irrégularité dans le régime des pluies d'une année à l'autre et au cours de la même année. De longues périodes de sécheresse dont les effets sont aggravés par la faible capacité de rétention des sols, sont à craindre en été, mais aussi pendant les autres saisons. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 950 mm.

Le *substratum géologique* est constitué essentiellement par les calcaires durs du Jurassique moyen et inférieur.

S'il existe dans cette région quelques accidents tectoniques, les couches sont généralement subhorizontales, expliquant ainsi la morphologie de ces plateaux avec cuesta. Certaines caractéristiques du sol comme la profondeur ou l'hétérogénéité du profil sont d'ailleurs liées au pendage comme l'on déjà fait remarquer SERVAT et NAERT (1966) sur les Causses de Roquefort. Dans certains secteurs, Causse de Lanhac par exemple, l'existence de couches imperméables peu profondes (marnes du Toarcien), explique l'absence d'un réseau karstique important et une morphologie plus régulière.

La nature des roches est souvent en étroite liaison avec la morphologie des sols et le type de végétation (rôle de la phytosociologie en zone non cultivée). La dureté des affleurements rocheux devra également être prise en considération pour appré-

cier la susceptibilité au dérochement. Les affleurements de calcaires dolomitiques sont toujours massifs et plus difficiles à disloquer que les calcaires s'altérant en plaquettes.

Sur ces terres de Causse, les *associations végétales* sont souvent au stade relique ou au stade pionnier par suite des actions anthropiques anciennes. La chênaie, en particulier, semble mieux adaptée sur les calcaires dolomitiques et siliceux du Bajocien que sur les calcaires en plaquettes. Si les boisements semblent parfois indépendants des caractéristiques des sols, il n'en est pas de même de la strate herbacée qui est bien différente sur calcaires et sur dolomies.

Sur calcaire, la pelouse herbacée est constituée avec dominance de *Festuca duriscula*, avec *Onosis striata, Thymus serpyllum, Kolleria valesiana.*

Sur dolomie, la pelouse à *Armeria juncea* comporte une flore riche et variée avec *Armeria hispida, Teucrium polium, Helianthemun canum, Euphorbia gerardiana, Saponaria bellidifolia, Aster alpinus.*

Si cette végétation apporte des informations précieuses dans la connaissance de la nature des sols, elle renseigne parfois sur le passé cultural. Les genévriers par exemple se développent souvent dans les secteurs anciennement cultivés alors que les buis colonisent surtout les terres incultes.

### 2. — *Les sols*

Sur ces plateaux calcaires, la morphologie et les caractéristiques des sols sont en étroite liaison avec la nature des roches sur lesquelles ils se développent.

Dans la région étudiée, il faut distinguer trois faciès principaux :

— les calcaires s'altérant en dalle et plaquette,
— les calcaires durs avec bancs épais localement dolomitiques,
— les calcaires dolomitiques et dolomies.

Sur les *calcaires en plaquette*, environ 50 p. 100 de la superficie, les sols sont généralement très caillouteux en surface et correspondent souvent aux anciennes zones de culture. La terre fine ne représente souvent que 15 à 40 p. 100 de l'ensemble de l'échantillon. La couleur rouge est liée à des teneurs en fer relativement élevées. Les sols sans être calcaires restent calciques et saturés. Dans le cadre de la classification française, ce sol caillouteux à fraction fine argileuse rouge, s'apparente aux *sols fersiallitiques rendziniformes.*

Sur *calcaires durs*, les sols, souvent discontinus et localisés dans les poches de dissolution ou dans les dolines, sont formés en grande partie par l'argile de décalcification des calcaires. Ils sont généralement moins graveleux que les sols rendziniformes mais plus riches en gros cailloux. Dans ces secteurs, la morphologie irrégulière montre de nombreux affleurements rocheux entre lesquels les boisements de chênes sont fréquents. Les sols sont du *type fersiallitique* et peuvent passer localement, lorsque le substratum est peu profond, à des sols rendziniformes.

Sur les *dolomies* (1/4 de la superficie), le paysage est souvent ruiniforme. Entre les affleurements rocheux, les sols ont une texture plus sableuse et sont du *type rendzine-dolomitique*. De profondeur très irrégulière, ils sont toutefois moins caillouteux et plus profonds que les sols sur calcaire en plaquette, comme l'a déjà souligné Cadillon (1970) dans son étude sur le Causse du Larzac.

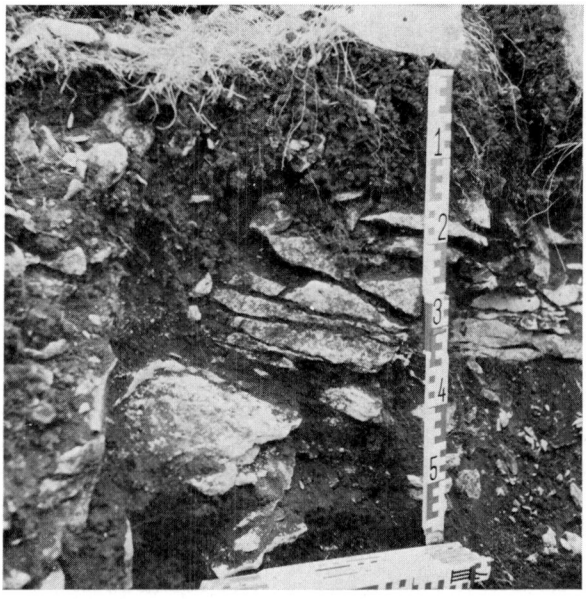


FIG. 1. — *Sol sur calcaire en plaquette du Bajocien*
(Sol fersiallitique rendziniforme)

Situé en zone 2 d'enrochement dislocable. Classe 2 de pierrosité et classe C de profondeur avec sous-sol, gélifracté.

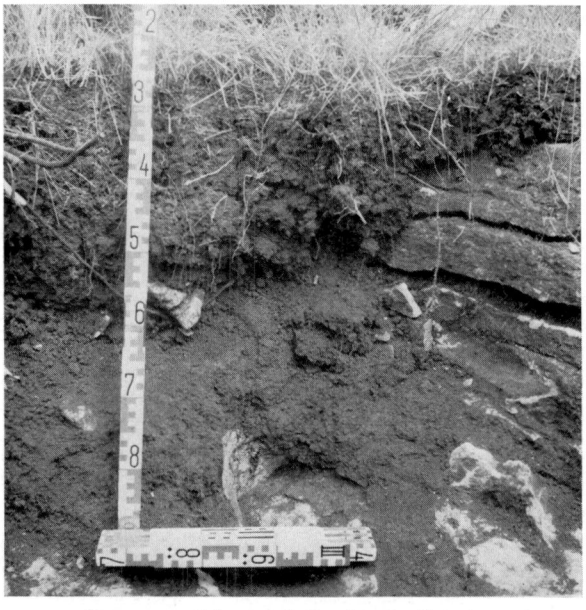


FIG. 2. — *Sol sur calcaire dur du Bajocien*
(Sol fersiallitique à réserve calcique)

Classe 2 d'enrochement dislocable. Classe 1 de pierrosité et classe B de profondeur de sol.

Si l'étude pédologique à moyenne échelle, faite sur l'ensemble de la région (25 000 ha) situe ces terres de Causse dans le contexte régional, l'étude plus détaillée au 1/10 000, des divers secteurs de friches (6 000 à 7 000 ha environ) a permis de montrer les nombreuses relations entre le sol, la végétation, la lithologie et la morphologie du paysage.

FIG. 3. — *Sol sur calcaire dolomitique*
(Rendzine dolomitique)
Sol développé dans les zones 1 d'enrochement massif. Classe 2 de pierrosité et classe C de profondeur.

Au cours de cette prospection, les principaux critères susceptibles d'intervenir dans le défrichement sont notés et permettent ainsi d'établir une carte thématique orientée vers l'aptitude des sols au défrichement.

Si certaines caractéristiques du sol, comme la profondeur ou la pierrosité sont des éléments importants pour la mise en valeur, ils ne sont pas les seuls a être pris en considération. L'environnement du sol (enrochement, végétation, morphologie, parcellaire, etc.) apporte également des informations indispensables. On voit donc tout l'intérêt d'une *cartographie pédologique préalable* au classement des terres, au point de vue de leur mise en valeur, et tout particulièrement dans ce cas de défrichement, où le choix et la localisation des zones à défricher devaient être conseillés.

## II. — CHOIX DES PARAMÈTRES CONDITIONNANT LE DÉFRICHEMENT

Si dans le détail, les sols étudiés montrent des caractéristiques pédologiques quelque peu différentes, ils présentent toutefois un ensemble de propriétés agronomiques assez voisines.

Il était donc nécessaire, pour obtenir un classement aussi exhaustif que possible des terres à défricher, de faire intervenir un certain nombre de critères sol complétés par des données relatives à l'environnement. De plus, compte tenu de la nature assez homogène du substratum calcaire, nous avons été également obligé de préciser certains critères habituellement retenus (CHRÉTIEN, 1968).

Parmi l'ensemble des paramètres susceptibles de guider le défrichement, nous avons tenu à prendre en considération :

— les facteurs qui interviennent d'abord sur l'aspect technique (possibilités d'intervention des engins) : topographie, fréquence des affleurements rocheux, type de parcellaire ;
— les facteurs plus spécifiquement agronomiques, liés à la nature du sol : pierrosité et profondeur du sol ;
— les données relatives à l'environnement végétal : couvert végétal et passé cultural ;
— l'éloignement des villages et la facilité d'accès sont également pris en considération ;
— l'importance relative des potentialités agronomiques de chaque sol pris à l'intérieur de ce contexte régional.

Si certains critères peuvent être facilement chiffrés (aspect quantitatif), il est aussi tenu compte de leur aspect qualitatif (nature de l'enrochement, forme et disposition des cailloux, importance de l'enracinement du couvert végétal, etc.) car ces caractéristiques jouent un rôle important dans l'aptitude des sols au défrichement.

### 1. — *La topographie*

Cinq classes de pente définissant des types de paysage ont été envisagées :

| | | *Paysage* |
|---|---|---|
| 1re | Pentes inférieures à 2 p. 100 | Plat ou faiblement ondulé |
| 2e | Pentes fortes comprises entre 2 et 8 p. 100 | Ondulé |
| 3e | Plus fortes pentes comprises entre 8 et 16 p. 100 | Vallonné |
| 4e | Plus fortes pentes comprises entre 16 et 30 p. 100 | Accidenté |
| 5e | Plus fortes pentes dépassant 30 p. 100 | Abrupt |

Il est généralement admis que la culture mécanisée ne peut être faite que sur des pentes inférieures à 16 p. 100 ; sur les fortes pentes, seule l'utilisation pastorale est à envisager car les risques d'érosion sont généralement importants.

### 2. — *Densité des affleurements rocheux*

Les affleurements rocheux ne sont plus, grâce aux moyens techniques actuels, des obstacles absolus au défrichement. Toutefois, leur densité et surtout leur nature (susceptibilité à la dislocation) doivent être prises en considération car elles déterminent la rentabilité du travail des gros engins de défoncement.

Les six classes d'enrochement retenues sont celles définies dans *Soil Survey Manual.*

*Classes d'enrochement.*

Classe 0 *Non ou très peu rocheux :* moins de 2 p. 100 d'affleurements, pas d'influence sur les façons culturales.

Classe 1 *Assez rocheux :* affleurements espacés de 35 à 100 m et couvrant 2 à 10 p. 100 de la surface.

Classe 2 *Rocheux :* affleurements espacés de 10 à 35 m et couvrant 10 à 25 p. 100 de la surface suivant leur disposition. Culture mécanisée délicate, mais si d'autres caractéristiques ne s'y opposent pas, on peut installer des céréales, plantes fourragères et pâturages en culture extensive.

Classe 3 *Très rocheux :* affleurements ou plages de sol trop superficiels, espacés de 3,5 à 10 m et couvrant de 25 à 50 p. 100 de la surface. Mécanisation des façons culturales impossible, sauf intervention de machines légères, dans les aires où le sol convient aux pâturages améliorés.

Classe 4 *Excessivement rocheux :* affleurements espacés au maximum de 3,5 m, couvrant 50 à 90 p. 100 de la surface. Emploi des machines agricoles rendu impossible par les affleurements.

Classe 5 *Rocher :* plus de 90 p. 100 de la surface est constitué d'affleurements rocheux.

Dans le classement, il sera également tenu compte de la susceptibilité de l'affleurement à la dislocation, facteurs intervenant directement sur le mode d'utilisation des engins de défoncement.

### 3. — *Pierrosité*

Sur roches calcaires, le sol sera d'autant plus pierreux que la roche aura tendance à se débiter en plaquette. Toutefois, les diverses classes de pierrosité devront tenir compte, non seulement de l'importance de la fraction caillouteuse, mais aussi de la présence d'éléments grossiers susceptibles de gêner les façons culturales (diamètre supérieur à 15 cm).

Le classement voisin de celui retenu par le *Soil Survey Manual* (1951) définit six classes principales.

*Classes de pierrosité.*

Classe 0 *Non ou très peu pierreux :* les pierres couvrent moins de 0,01 p. 100 de la surface. Aucun effet sur le travail du sol.

Classe 1 *Assez pierreux :* les pierres couvrent de 0,01 à 0,1 p. 100 de la surface avec des pierres de 15 à 30 cm de diamètre espacées de 10 à 30 m. Assez de pierres pour gêner les façons culturales.

Classe 2 *Pierreux :* pierres de 15 à 30 cm de diamètre, espacées de 1,6 à 10 m, couvrant 0,1 à 3,0 p. 100 de la surface du sol. Les pierres gênent les façons culturales et les sols conviennent surtout aux cultures fourragères et aux prairies.

Classe 3 *Très pierreux :* 3,0 à 15 p. 100 de la surface du sol sont couverts par des pierres de 15 à 30 cm de diamètre, espacées de 75 à 160 cm. L'emploi de machines est impossible sauf quelques machines légères pour mettre en place des prairies améliorées.

Classe 4 *Excessivement pierreux :* les pierres de 15 à 30 cm de diamètre, espacées de moins de 75 cm couvrent 15 à 90 p. 100 de la surface. Tout emploi de machine est impossible.

Classe 5 *Pierres :* surface couverte par des pierres à plus de 90 p. 100.

Ces mesures de surface ont été complétées et chiffrées sur le terrain par des tamisages pour connaître le pourcentage approximatif de terre fine.

Sans être très précise, cette technique d'appréciation de la pierrosité est particulièrement pratique en zone méditerranéenne où le couvert végétal peu dense, laisse apparaître une grande partie de la surface du sol.

### 4. — *Profondeur du sol*

Sur les terres de Causse, la profondeur du sol est toujours très irrégulière. L'impossibilité d'une appréciation statistique par sondage à la tarière, par suite d'une pierrosité excessive, nous a amené à effectuer des tranchées d'une longueur de 4 m environ. Sur 5 000 ha de friche, 100 tranchées ont été réalisées. Cette densité correspond à celle utilisée pour une cartographie au 1/100 000, mais dans le contexte particulier des terres de Causse, ces observations paraissent suffisantes pour répondre aux problèmes pratiques posés dans ce cas particulier.

En dépit des variations multiples de la profondeur sur la longueur d'une même tranchée, il a été possible de définir 4 classes de profondeur moyenne.

Classe A *Profondeur supérieure à 40 cm :* caractérise surtout les sols développés dans les dépressions argileuses ou le fond des dolines. Pas de risques de remonter des fragments rocheux avec des labours profonds.

Classe B *Profondeur comprise entre 15 et 40 cm* avec fentes de remplissage. Nous soulignons par là, l'irrégularité de profondeur du sol et la présence d'un sous-sol fissuré ou gélifracté dans lequel les espaces sont remplis d'argile rouge de décalcification.

Classe C *Profondeur comprise entre 10 et 25 cm* avec fentes de remplissage. Caractérise souvent les secteurs très caillouteux et pierreux.

Classe D *Profondeur inférieure à 10 cm :* zones de sols très superficiels localisées sur fortes pentes et sur calcaire dolomitique sensible à l'érosion.

Lorsque certaines zones montrent des sols de profondeur différente, les deux principales classes de profondeur sont alors notées conjointement, la plus représentée étant notée la première.

### 5. — *Couverture végétale*

Si la phytosociologie rend compte de certaines caractéristiques édaphiques (nature des sols, profondeur, passé cultural) (Libois et Chrétien, 1968), la nature, la densité de ce couvert végétal renseignent sur l'aptitude des parcelles au défrichement. La présence d'espèces ligneuses comme les chênes ou les buis, sont autant d'obstacles qu'il faut prendre en considération.

*Couvert végétal.*

Type *a* *Cultures :* les secteurs actuellement cultivés (céréales, plantes fourragères, etc.)n'entrent évidemment pas dans le cadre du défrichement

Type *b* *Pelouses et prairies :* ces zones de parcours colonisées par une maigre pelouse à base de graminées et légumineuses, peuvent être facilement retournées à l'aide d'une charrue à disques lorsqu'il n'y a pas d'affleurements rocheux importants.

Type *c* *Pelouse avec genévriers :* si la présence de nombreux genévriers est souvent un indice de profondeur de sol (classe B), ces arbustes, lorsqu'ils prennent une importance trop grande, réduisent considérablement la superficie des terrains de parcours exploitable par les moutons. La suppression des genévriers ne pose pas de problèmes particuliers.

Type *d* *Pelouse avec haies de buis et genévriers :* nous avons voulu souligner dans certains secteurs la présence de buis développés en bordure des murettes car ces arbustes présentent un système radiculaire très résistant, difficile à supprimer.

Type *e* *Prés-bois :* cette association caractérise les pâturages, colonisés par un boisement discontinu de chênes (30 à 50 chênes à l'hectare). L'arrachage de ces arbres avec système radiculaire souvent superficiel peut être réalisé avec un bulldozer de puissance moyenne. La vente du bois est un aspect qu'il faut prendre en considération, dans cette région du moins.

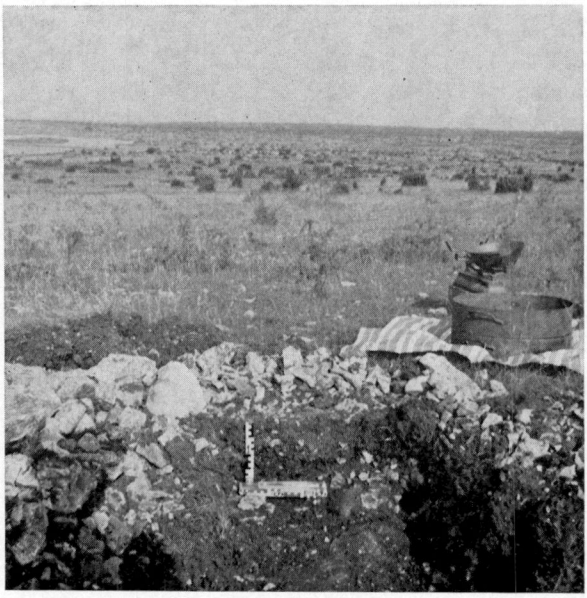


FIG. 4. — *Pelouse à genévriers*

Zone de sols pierreux (classe 2). Classe C de profondeur, assez rocheux (classe 1). Secteur apte au défrichement (zone 1).

FIG. 5. — *Zone bocagère*

Pelouse avec chêne et prunelier (prés-bois, type *e*). Zone de sols assez pierreux (classe 1). Classe B de profondeur. Assez rocheux (classe 1 facilement dislocable). Secteur apte au défrichement.

Type *f* *Prairies humides :* zone de pâturage limitée aux dépressions argileuses et humides. Trop souvent les prairies sont entourées de haies qu'il serait souhaitable de supprimer, afin d'améliorer la structure des parcellaires existants.

Type *g* *Bois :* les secteurs boisés se localisent généralement dans des zones où la topographie est accidentée.

### 6. — *Parcellaire*

Dans ce contexte régional, compte tenu des vocations culturales orientées vers les fourrages et céréales, 3 classes principales de parcellaire pourraient être retenues:

— à proximité immédiate des villages : parcelles minimales de 1 à 2 ha ;
— dans les secteurs facilement accessibles : parcelles de 3 à 6 ha ;
— dans les secteurs éloignés, plus difficilement accessibles : parcelles de l'ordre de 10 ha.

Dans le cas où le regroupement des parcelles pose des problèmes de remembrement, il serait souhaitable que les travaux de défrichement améliorent le parcellaire existant, en donnant aux nouvelles parcelles, non seulement une plus grande superficie, mais également des formes rectangulaires pour faciliter la culture mécanisée.

Les petites parcelles (superficie inférieure à 1 ha) sont souvent entourées par des murettes de pierres sèches qu'il faudrait supprimer.

## III. — CLASSEMENT DES TERRES EN VUE DU DÉFRICHEMENT

Il est nécessaire, en fonction d'un problème posé, d'établir une relation d'ordre entre les différents paramètres pris en considération.

Tout problème de défrichement nécessite l'intervention de machines. Les critères limitant l'utilisation des engins, c'est-à-dire la pente (topographie) et la présence des affleurements rocheux seront donc les deux facteurs principaux retenus pour définir les grands secteurs d'aménagement.

A l'intérieur de chaque secteur et sous-secteur, les renseignements relatifs aux caractéristiques pédologiques (pierrosité, profondeur du sol) et aux paramètres de l'environnement (couvert végétal, parcellaire, présence de murettes), seront soigneusement notés et apporteront des renseignements complémentaires pour apprécier le coût et l'intérêt du défrichement. Toutefois, la classe D de profondeur du sol (profondeur inférieure à 10 cm) et les fortes pierrosités (classes 4 et 5) pourront intervenir à un niveau supérieur pour le choix des secteurs à défricher. D'ailleurs, celles-ci correspondent souvent aux zones de fortes pentes ou à des secteurs avec nombreux affleurements rocheux.

Les principales zones d'aménagement retenues ont été les suivantes (tabl. 1) :

### 1. — *Zones ne présentant pas d'obstacles majeurs au défrichement*

— Classe de pente 1, 2 et 3 (topographie peu accidentée),
— classe d'enrochement 0 et 1 (affleurements rocheux peu importants facilement dislocables).

### 2. — *Zones présentant une ou plusieurs caractéristiques défavorables au défrichement*

— Classes d'enrochement (2 et 3) avec affleurements massifs,
— classe de pente 4 (topographie très accidentée),
— sols très pierreux (classes 4 et 5) ou très superficiels (classe 4).

TABLEAU I

*Classes des différents paramètres* (1)

| Topographie | Enrochement | | | Pierrosité | Profondeur du sol | Couverture végétale |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Classe | Nature | | | | |
| | | Dislocable | Massif | | | |
| 1 | 0 | | | 0 | A | a |
| 2 | 1 | | | 1 | B | b |
| 3 | 2 | | | 2 | C | c |
| 4 | 3 | | | 3 | | d |
| 5 | 4 | | | 4 | D | e |
| | 5 | | | 5 | | f |
| | | | | $\underline{5}$ | | g |

Zone I ne présentant pas d'obstacles majeurs au défrichement

Zone II présentant une ou plusieurs caractéristiques défavorables

Zone III déconseillée pour le défrichement

$\underline{5}$ Présence d'anciennes murettes et tas de cailloux

(1) Nota : Les classes de topographie, d'enrochement et de forte pierrosité (classe 4 et 5) déterminent les principaux secteurs de défrichement, alors que la pierrosité, la profondeur du sol et la couverture végétale n'apportent que des renseignements complémentaires.

### 3. — *Zones déconseillées pour le défrichement*

— Classes d'enrochement 4 et 5 (affleurements fréquents et massifs),
— forte pente supérieure à 30 p. 100 (classe 5).

Ce classement a donc été établi en fonction de certaines caractéristiques relatives à l'environnement, intervenant directement sur les possibilités techniques d'intervention, auxquelles s'ajoutent les données pédologiques (profondeur, pierrosité) et écologiques prises en considération pour orienter le type de culture (fourragère ou céréalière) et pour définir le coût du défrichement.

Toutes ces données tiennent compte du contexte agricole de cette région. Il est évident que dans d'autres régions des Causses où les possibilités culturales sont plus variées par suite de l'altitude plus basse ou de l'existence de sols très divers, le classement des secteurs et les types d'aménagement pourraient être modifiés.

## IV. — REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE

Si l'étude de reconnaissance sur l'ensemble du canton a été effectuée au 1/100 000, l'étude détaillée des secteurs en friche a été faite au 1/10 000 sur photographies aériennes et transcrite sur les fonds d'assemblages cadastraux des différentes communes.

Pour donner aux cartes thématiques un aspect *synthétique* avec le maximum de renseignements, chaque secteur d'aménagement est représenté par une couleur à l'intérieur de laquelle les figurés distinguent les sous-secteurs.

Superposée à ce mode de représentation, une codification alphanumérique renseigne chaque unité sur les caractéristiques relatives à la pierrosité, la profondeur du sol et le couvert végétal (légende annexe complémentaire de type *analytique*).

Enfin, le fond topographique établi d'après les tableaux d'assemblage du cadastre (échelle au 1/10 000), renseigne sur le parcellaire existant.

Cette représentation de type synthétique complétée par une codification alphanumérique transcrit bien les divers degrés d'importance des critères retenus.

D'emblée, l'importance et la répartition des secteurs facilement défrichables sont visibles sur la carte. Dans le cas présent, près de 2 000 ha sur 6 000 ha de friche pourront être remis en valeur immédiatement.

A l'intérieur de chaque unité, la codification alphanumérique apporte le maximum de renseignements et permet d'apprécier le coût du défrichement (importance de l'épierrage, difficulté de supprimer le couvert végétal) ou d'orienter les cultures céréalières ou herbagères en fonction de la profondeur du sol.

Ce mode de représentation permet ainsi de rendre une carte à la fois détaillée, complète et simple sur laquelle il sera facile de faire un bilan des différents secteurs, et d'obtenir à l'intérieur de chaque unité, le maximum de renseignements.

## V. — POINT DE VUE ÉCONOMIQUE : COÛT ET RENTABILITÉ DES TRAVAUX DE DÉFRICHEMENT

### 1. — *Mode et coût du défrichement*

Pour donner au classement proposé ci-avant toute sa valeur sur le plan pratique, il est utile d'essayer de chiffrer le coût de mise en valeur des divers secteurs, en heures de travail ou en fonction du nombre d'opérations nécessaires pour chacune des classes.

Les coûts varient non seulement en fonction de l'importance des marchés, des difficultés (topographie, enrochement, pierrosité, couvert végétal...), mais dépendent également :

— de la puissance des engins (l'A. D. R. A. A. exige une puissance minimum de 150 CV), de leur équipement (les bulldozers équipés de relevage hydraulique à commande directe ou Powership apportent un gain de temps de 1/3 pour l'arrachage des arbres et des souches),
— des conditions atmosphériques,
— de la forme et de la superficie du secteur à défricher.

Néanmoins, à la suite d'exemples de défrichements réalisés, soit par certains agriculteurs sur le Causse du Comtal, soit par l'Association départementale de Rénovation agricole de l'Aveyron (A. D. R. A. A.) sur le Causse de Villeneuve, il est possible de chiffrer le coût approximatif du défrichement en fonction de l'importance des travaux effectués.

*a*) Les défrichements réalisés sur le *Causse du Comtal* ont généralement été effectués en zone 1, présentant peu d'affleurements rocheux (classes 0 et 1).

L'intervention de bulldozers d'une puissance moyenne de 60 ou 100 CV a consisté essentiellement à l'arrachage des arbres ou des buissons, à disloquer quelques affleurements rocheux avec transport des plus gros blocs. Le *défoncement au ripper n'a donc pas été effectué systématiquement sur l'ensemble des parcelles défrichées*. Dans ce cas, les travaux complémentaires (épierrage, labour avec charrue à disques trisoc) sont à la charge des agriculteurs.

En 1970, en zone 1 avec couverture végétale de type près-bois (type *e*) sur une parcelle de 5 ha, le coût s'est élevé à 500 F/ha. La vente du bois, dans ce contexte particulier a été effectuée sur une base de 70 F le m³ pour le gros bois et 10 F le m³ pour le petit bois.

En zone 1, avec couverture végétale de pelouse de genévrier (type *c*) sur une parcelle de 5 ha, le coût des gros travaux s'est élevé à 250 F/ha.

Dans ces prix, n'intervient pas le coût des travaux complémentaires supportés par l'exploitant, qui doit tenir compte aussi bien de l'amortissement de son matériel que du temps consacré à ce travail.

*b*) Les travaux d'aménagement entrepris par l'A. D. R. A. A. pour le défrichement des terres du *Causse de Villeneuve*, montrent un aspect tout à fait différent qui, dans la plupart des cas, consiste en un *défoncement systématique des parcelles avec passage du bulldozer-dessoucheur, équipé de « ripper »*.

La puissance minimale des engins étant de 150 CV, les pierres de diamètre supérieur à 10 cm sont ensuite ramassées et évacuées en bordure du champ. La pulvérisation du sol et le concassage des pierres sont effectués jusqu'à 10 ou 20 cm de profondeur selon les cas, avec un engin approprié. Lorsque cette pulvérisation n'est pas utile, le défoncement est suivi du passage d'une charrue à disques (2 × 8 disques cannelés de 80 cm de diamètre et placés en V).

Les parcelles défrichées sont alors facilement cultivables et permettent ainsi une culture plus intensive.

Comme nous l'avons déjà dit, le coût des travaux à entreprendre est fonction de l'enrochement, de la pierrosité, du couvert végétal, de la topographie, etc. Ce coût

pour chaque type de travaux a pu être apprécié après diverses études de marché entre les techniciens de l'association et les entrepreneurs.

A titre indicatif, nous joignons ci-après un bordereau des prix mis en parallèle avec les diverses classes données dans le paragraphe 2 (tabl. 2).

TABLEAU 2

| Référence des Classes du parag. II | Travaux sur les sols | Prix unitaire HT en francs (TVA 23 % non comprise) |
|---|---|---|
| Classes 0 et 1 d'enrochement | I - *Travaux de défonçage sur le sol non rocheux* ou très faiblement rocheux, comprenant, passage croisé sur toute la surface d'un Ripper porté par un tracteur d'une puissance minimale de 150 CV. Les dents du Ripper seront espacées de 1,00 m au maximum et pénétreront de 0,60 m en profondeur ; compris passage d'un pulvériseur lourd à disques. | |
| | Prix à l'hectare ..... | 570 |
| Classes 2, 3 et 4 d'enrochement | II - *Travaux identiques aux précédents mais effectués sur sol rocheux.* Les pierres arrachées dont la plus grande dimension sera supérieure à 10 cm seront évacuées en bordure du champ par un râteau approprié ou par tout autre engin préalablement agréé. | |
| Classes de pierrosité | La pulvérisation du sol sera assurée ensuite par un engin approprié. Ces travaux seront payés à l'hectare, en fonction du volume de pierres évacuées : | |
| *a* : 0 et 1 | *a*) inférieur à 80 m³/ha ..... | 1 178 |
| *b* : 2 | *b*) compris entre 80 et 150 m³/ha ..... | 1 382 |
| *c* : 3 | *c*) compris entre 150 et 200 m³/ha ..... | 1 662 |
| *d* : 4 et 5 | *d*) supérieur à 200 m³/ha..... | 2 038 |
| Classes de couvert végétal | III - *Défrichage par passage de lame débroussailleuse* et évacuation des végétaux en bordure de parcelles, compris nivellement du sol. | |
| | Prix à l'hectare : | |
| Type *b* et *c* | *a*) sur friche peu abondante ou clairsemée..... | 382 |
| Type *c* et *d* | *b*) sur végétation arbustive plus dense et d'une hauteur dépassant 2,50 m ..... | 447 |
| Type *c* | *c*) comprenant arrachage des arbres d'un diamètre de 0,15 m de moyenne..... | 569 |
| Type *e* ou *g* | *d*) comprenant arrachage des arbres d'un diamètre de 0,30 m de moyenne..... | 666 |
| Type *g* ou *e* | *e*) comprenant arrachage des arbres d'un diamètre atteignant 0,50 m ..... | 747 |
| Type *g* | *f*) comprenant arrachage des arbres de tous diamètres, à enracinement profond ..... | 975 |
| Pierrosité Classe 5 | IV - *Enlèvement de murs de pierres sèches* y compris fondation, compté au m³ et déplacé jusqu'à 100 m..... | 2,44 |
| | V - *Arrachage de haies arbustives* avec éventuellement talus, compris dessouchage par passage croisé de Ripper, compris | |

TABLEAU 2 (*suite*)

| Référence des Classes du parag. II | Travaux sur les sols (1) | Prix unitaire HT en francs (TVA 23 % non comprise) |
|---|---|---|
| | rangement des végétaux en cordon, nivellement de talus d'une hauteur maximale de 1 m, compté en mètres linéaires | 1,62 |
| | VI - *Arrachage de haies* constituées essentiellement d'arbres d'un diamètre supérieur à 20 cm, compris éventuellement nivellement de talus d'une hauteur maximale de 1 m, dessouchage par passage croisé du Ripper, compris rangement des végétaux en cordon. Compté en mètres linéaires | 2,84 |
| | VII - *Arrachage de haies* constituées essentiellement d'arbres d'un diamètre supérieur à 20 cm, compris nivellement de talus d'une hauteur supérieure à 1 m et maximale de 3 m comprenant raccordement aux pentes aval et amont, jusqu'à la distance de dix fois la hauteur du talus initial. Compté en mètres linéaires | 3,65 |
| | VIII - *Arasement de talus* d'une hauteur maximale de 1 m comprenant raccordement aux pentes aval et amont, jusqu'à la distance de dix fois la hauteur du talus initial. Compté en mètres linéaires | 1,46 |
| | IX - *Arasement de talus* d'une hauteur supérieure à 1 m et maximale de 3 m comprenant raccordement aux pentes aval et amont jusqu'à la distance de dix fois la hauteur du talus initial. Compté en mètres linéaires | 3,25 |
| | X - *Terrassement en pleine masse*, en toute nature de terrain, compris toutes sujétions, distance maximale de transport 100 m. Compté en mètre cube | 1,62 |

(1) Référence adjudication du 31 janvier 1971. Lot n° 2 présenté par l'A. D. R. A. A. à Villefranche-de-Rouergue (Aveyron).

Ce classement ainsi présenté n'est pas limitatif, chaque nouveau cas particulier peut faire l'objet d'étude de marché.

En prenant un exemple dans une zone I (non ou faiblement rocheux) avec une pierrosité de classe I et un couvert végétal avec arbres d'un diamètre de 30 cm (couvert végétal type *e*), le coût du défrichement, avec passage systématique du Ripper et pulvérisation du sol, serait environ de 2 300 F/ha.

### 2. — *Mode de défrichement et rentabilité des travaux*

Comment faire un choix entre ces deux types de défrichement :

— ou simple disquage et dislocation des affleurements rocheux ?

— ou passage systématique du Ripper avec pulvérisation ?

Il est évident lorsque le défoncement et le concassage ne sont pas effectués sur l'ensemble de la surface, que l'agriculteur est obligé d'épierrer chaque année. Toutes choses étant égales par ailleurs, les rendements sont toujours supérieurs lorsque les parcelles ont été défoncées et pulvérisées. La bonne stabilité de la structure des terres rouges du Causse joue par là un rôle fondamental.

Sur le Causse du Comtal, les rendements moyens obtenus après défrichement sans défoncement systématique sont de l'ordre de 25 à 30 q/ha pour l'orge, alors que, sur le Causse de Villeneuve, certaines exploitations nouvellement défrichées avec Ripper et pulvérisation ont récolté en moyenne 45 quintaux d'orge et 28 quintaux de colza! Ces différences sont parfaitement significatives, encore faut-il que les fertilisations soient identiques; de plus il faut souligner que le climat de Villeneuve (altitude 300 m) est moins rigoureux que celui du Causse du Comtal (altitude 600 m).

Si l'on considère que les terrains de parcours non entretenus ne rapportent guère que 100 à 300 UF/ha sur le Causse du Comtal et 200 à 500 UF/ha sur le Causse de Villeneuve, dans le premier cas l'augmentation de rendement par hectare a été environ de 2 500 UF pour un coût de défrichement de 500 F, alors que dans le second cas l'augmentation de rendement de 4 000 UF correspond à un coût de 2 500 F (1). Une étude économique plus poussée pourrait être envisagée pour comparer ces deux options.

Toutefois, pour entreprendre une telle étude, il faut également se placer dans le contexte agricole et économique local. Par suite de son altitude relativement élevée, le Causse du Comtal est plus orienté vers l'agriculture extensive et l'élevage des brebis, les aménagements à entreprendre pour remettre les terrains en culture devront donc être moins coûteux pour être rentabilisés. Sur le Causse de Villeneuve, par suite de la nature des sols, généralement plus frais et plus profonds, du climat plus chaud, il est possible d'envisager une agriculture plus intensive pouvant supporter des investissements plus élevés à l'hectare, justifiant ainsi le mode de défrichement adopté par l'A. D. R. A. A.

Enfin, dans tous les cas, il est bien évident que de tels travaux ne peuvent trouver leur rentabilité maximale et leur justification que dans la mesure où ils intéressent des agriculteurs dynamiques, poursuivant l'amélioration des sols par une fertilisation rationnelle.

Nous ne développerons pas les divers aspects de la production fourragère sur ces terres de Causses, ceux-ci ont déjà fait l'objet de nombreuses études d'expérimentation (COTTE, 1967), en liaison avec les C. E. T. A. du Sud-Aveyron et la Cave Coopérative de Roquefort.

## CONCLUSION

Le classement des terres proposé en vue de l'aptitude au défrichement tient compte d'un ensemble de paramètres relatifs aux caractéristiques des sols, à l'écologie et à l'environnement. Comme nous l'avons vu dans le dernier chapitre relatif au coût du défrichement, la classification établie à partir des normes déduites

(1) Ces travaux de défrichement sont généralement subventionnés à 50 p. 100 par l'État, le reste pouvant être emprunté au Crédit agricole à 5 p. 100 en 20 ans.

de l'étude pédologique préalable, s'intègre assez facilement dans un classement pratique, dressé par les techniciens réalisant actuellement ces travaux de défrichement. Il est alors possible à l'aide de tels renseignements, d'établir un coût approximatif des opérations à effectuer dans les diverses unités d'aménagement.

Toutefois dans le secteur étudié (Causse du Comtal), les zones retenues en priorité intéressent des secteurs facilement défrichables où le défoncement n'est pas conseillé systématiquement, réduisant ainsi considérablement le coût des travaux à supporter par chaque agriculteur. Cette solution proposée tient implicitement compte du contexte agricole de cette région ; agriculture extensive avec un climat relativement rigoureux et une vocation herbagère. Sur le Causse de Villeneuve, un contexte agricole différent semble au contraire justifier le défoncement systématique au Ripper et la pulvérisation des sols, pour permettre une agriculture plus intensive et plus compétitive qui pourra d'ailleurs être encore intensifiée ultérieurement par l'irrigation. Dans ce dernier cas, l'utilisation de moyens très puissants permet d'élargir considérablement les possibilités de défrichements et d'étendre ainsi la gamme des secteurs récupérables.

Le classement retenu dans le premier cas sur le Causse du Comtal, n'est donc qu'un classement relatif, il pourrait être sensiblement modifié si les objectifs et les moyens étaient différents. La méthode ainsi utilisée, intégrant les données du terrain au problème posé et au contexte économique de la région, est donc plus souple et plus proche de la réalité que l'utilisation d'une codification qui ferait intervenir des normes chiffrées et absolues, définissant des classes trop rigides.

Si au moment où l'on parle d'environnement et de sauvegarde de la nature, il semble peut-être délicat d'entreprendre des défrichements, il ne faut pas oublier que ces aménagements constituent pour les agriculteurs de ces régions la seule possibilité d'évolution et de survie, d'autant plus que ces travaux de défrichements sont souvent en liaison avec des reboisements. Sauvegarder la nature, c'est aussi aider l'homme à rester dans son milieu naturel.

*Reçu pour publication en octobre 1971.*

## REMERCIEMENTS

Quelques échanges de vue amicaux avec mes camarades M. Bornand et J. P. Legros m'ont été utiles pour préciser la méthodologie employée.

Un accueil particulièrement aimable m'a été réservé par l'*Association départementale de Rénovation agricole de l'Aveyron* (A. D. R. A. A.) qui m'a fait profiter de son expérience en matière d'aménagement.

## SUMMARY

METHOD OF EVALUATION AND GRADING OF THE « CAUSSE » SOILS
FOR LAND CLEARING PURPOSES
EXAMPLE IN THE SOUTHERN AVEYRON CAUSSES

Within the scope of a land reclamation project for the Causses, soils have been graded in order to determine their clearing capabilities. This grading allows for the parameters likely to affect the technical conditions governing the possibility of using machinery (topography, density of

rocky outcrops), the agronomic conditions (stoniness, soil depth and nature), lastly the conditions related to the environment (vegetal cover, former cultivated plot, accessibility, remoteness).

A pedological study carried out prior to such grading shows, in particular, the relations between the various parameters. This study is completed by a map showing the clearing capabilities of the lands.

As regards mapping, the synthetic presentation adopted to classify the various management areas is completed by alphanumeric coding providing data as to the cost and profitability of the work.

Lastly, a typical project considers the economic aspect of clearing in the agricultural structure of the region.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BEWERTUNGS- UND KLASSIFIZIERUNGSMETHODE FÜR DIE BÖDEN DER CAUSSE (1) IN HINSICHT AUF DIE NUTZBARMACHUNG EIN BEISPIEL AUS DEN CAUSSES IM SÜDLICHEN TEIL DES FRANZÖSISCHEN AVEYRON-DEPARTEMENTS

Im Rahmen der Aufwertung der Causse-Böden unternahm der Verfasser eine Einteilung der Böden in Hinsicht auf ihre Eignung zur Nutzbarmachung. Diser Einteilung berücksichtigt die eventuell in Frage kommenden Paramter wie : leitende technische Erwägungen über eine mögliche Intervention von Maschinen (Topographie, Häufigkeit der oberflächlichen Felsen), landwirtschaftliche Gesichtspunkte (steinige Beschaffenheit, Riefe und Natur des Bodens) ; schliesslich Eigenschaften bezüglich der Umwelt (Pflanzendecke, ehemalige Parzellierung, Zugänglichkeit, Abgelegenheit).

Die pedologische Untersuchung, die diese Klassifizierung voranging, ziegt besonders die bestehenden Beziehungen zwischen den verschiedenen Parametern. Diese Untersuchung wird durch eine thematische Karte vervollständigt, die dem Benutzer über die Eignung der Böden zur Nutzbarmachung Auskunft gibt.

Vom kartographischen Gesichtspunkt aus wird die für die Klassifizierung von verschiedenen Bewirtschaftungssektoren engenommene Darstellung nach syntetischem Typus durch eine alphanumerische Kodifizikation vervollständigt, die über Angaben Auskunft gibt, die die Untersuchungen über Kosten und Rentabilität der Arbeiten wichtig sein konnen.

Abschliessend wird eine Bewirtschaftungsbeispiel für die oekonomischen Gesichtspunkte bei der Nutzbarmachung des landwirtschaftlichen Geprages der Region gezeigt.

## РЕЗЮМЕ

### Методы оценки и классификации целинных почв района неплодородных известняков в виду их будущего освоения.

### Пример неплодорондых известняков юга департамента авейрон.

Ж. КАЛЛО.

В рамках освоения почв района неплодородных известняков юга Франции, автор классифицировал почвы эти в зависимости от их способности к освоению. Классификация эта принимает во внимание параметры характера технического, то-есть указывающие возможность механизации (топография, частота скалистых обнажений), агрономического (каменистость, глубина и природа почвы) и экологического (растительный покров, древнее разделение на участки, легкость доступа, отдаленность).

Педологическое изучение, проведенное до учереждения классификации выявило, в частности, связи существующие между разными параметрами.

(1) (Causse = nackte, wellenformige und wasserlose Hochebene).

Изучение это было также дополнено тематической картой, осведомлявшей утилизатора о пригодности почв к освоению.

С точки зрения картографической, изображение синтетического типа, принятого для классификации различных секторов планировки, дополняется альфа-нумерической классификацией, осведомляющей о данных могущих повлиять на стоимость и рентабельность работ.

И, наконец, на примере планировки, рассматривается экономический аспект освоения в сельскохозяйственном контексте данного района.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


CADILLON M., 1970. *Les Sols des Causses du Larzac.* Thèse 3e cycle. Option Agronomie-Pédologie. Faculté des Sciences de Montpellier.

CALLOT G., 1971. Étude pédologique du canton de Bozouls (Aveyron). *S. E. S.* nº 146, janvier 1971, Montpellier.

CHRÉTIEN J., 1968. Exemple d'une méthode d'étude des terrains en friche en vue de leur mise en valeur. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 272-278.

COTTE A., 1967. État actuel et amélioration de la production fourragère dans le sud du Massif central. *Fourrages, 31.*

DEFFONTAINES J.-P., GRAS R., 1968. Les facteurs techniques de la production de la pêche tardive en moyen Vivarais. *Ann. agron.*, **19**, 1, 5-51.

LIBOIS A., CHRÉTIEN J., 1968. Note préliminaire sur la recherche d'une relation entre la flore et le sol, dans les friches du Jura plissé du sud. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 934-938.

SERVAT E., NAERT B., 1966. Étude pédologique des Causses de Roquefort (Aveyron). *S. E. S.* nº 51, Montpellier.

SOIL SURVEY MANUAL, by Soil Survey Staff, Bureau Agriculture Research Administration, United States Department of Agriculture, 1951.

STEWART G. A., 1968. Land Evaluation. Paper of a *C. S. I. R. O. Symposium. Organized in Cooperation north U. N. E. S. C. O.* Division of Land Research C. S. I. R. O., Camberra, Australia.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (2), 165-196.

# VARIATIONS DE LA TENEUR EN COBALT DES RAY-GRASS ÉTUDE DE TECHNIQUES D'ENRICHISSEMENT

M. COPPENET, Éliane MORÉ, L. LE CORRE et Micheline LE MAO

*Station d'Agronomie, I. N. R. A.,*
*29 S - Quimper*

## RÉSUMÉ

Les auteurs ont travaillé, essentiellement, sur le ray-grass d'Italie (*Lolium italicum*) récolté en Bretagne sur des sols de réaction légèrement acide, riches en matière organique et formés, soit sur des roches granitiques pauvres en cobalt, soit sur des schistes primaires bien pourvus en cobalt.

L'influence de la richesse en cobalt du sol sur la teneur en cobalt du ray-grass est très importante et il en est de même de l'époque de l'année et du stade physiologique de la plante. La figure 5 résume tout le présent mémoire. Les teneurs des ray-grass ne recevant pas d'apports de sels de cobalt sont comprises entre 0,02 et 0,15 p.p.m. Co par rapport à la matière sèche.

Le ray-grass au stade épiaison étant moins riche qu'au stade pâture, seuls les pâturages de ray-grass cultivés sur les sols schisteux bien pourvus en cobalt (0,84 p.p.m. de cobalt acétique) fournissent une matière sèche d'une teneur suffisante en cobalt (0,110 p.p.m.) pour couvrir les besoins des ruminants, estimés à 0,07 p.p.m.

Les pâturages les moins riches en cobalt sont ceux des régions granitiques (Co acétique des sols = 0,24 p.p.m.) et au début de l'année, puisqu'ils ne contiennent, en moyenne, à ce moment-là, que 0,045 p.p.m. Co.

L'élévation du pH des sols sous l'influence des amendements calcaires provoque une nette diminution du cobalt contenu dans la plante ; par contre, les apports de nitrate d'ammoniaque sur la prairie de ray-grass pur provoquent, en général, un accroissement de la teneur qui s'explique par l'acidification superficielle occasionnée.

L'étude de l'enrichissement en cobalt du ray-grass par le sulfate de cobalt a été poursuivie de plusieurs manières : 1° en pots, par mélange à toute la masse de terre ; 2° en plein champ, avec incorporation par labour, avant le semis ; 3° en plein champ, avec incorporation par les façons superficielles précédant le semis ; 4° en épandage à sec sur un ray-grass déjà implanté ; 5° en pulvérisations foliaires très diluées (0,01 p. 1 000).

C'est l'épandage à sec sur un ray-grass déjà implanté qui donne le plus fort coefficient d'enrichissement (× 8 ou × 10), même pour une dose de 2 kg de sulfate de cobalt par hectare.

## INTRODUCTION

Les ray-grass, et plus spécialement le ray-grass d'Italie, sont les graminées fourragères les plus cultivées en Bretagne. C'est cette dernière graminée qui a le plus contribué à l'intensification fourragère des vingt dernières années ; le ray-grass

d'Italie (*Lolium italicum*) est très cultivé en culture pure, mais aussi en mélange avec le trèfle violet, alors que le ray-grass anglais (*Lolium perenne*) est utilisé dans les prairies temporaires en association avec le trèfle blanc.

Le climat océanique très accusé de l'extrémité occidentale de la presqu'île bretonne permet au ray-grass italien de fournir presque en toutes saisons des pâturages abondants et de qualité : semé en août, il peut donner deux pâturages au cours de la période hivernale, plus un foin au mois de juin suivant ; semé fin mars, il fournira 4 ou 5 pâturages dans l'année. En seconde année, le ray-grass italien perd assez vite ses potentialités, il s'éclaircit et se laisse envahir par les mauvaises herbes. On lui apporte généralement 50 à 60 unités d'azote de l'ammonitrate après chaque passage des animaux et, dans ces conditions, on obtient facilement 10 000 unités fourragères par hectare et pour une seule année.

Nous avons déjà étudié la composition minérale des ray-grass ainsi que celle d'autres graminées fourragères pérennes tels les dactyles, les fétuques, la fléole et donné les résultats dans deux publications (COPPENET et CALVEZ, 1962 ; COPPENET, 1964). Nous avions alors précisé les variations saisonnières, les variations interspécifiques pour les éléments majeurs puis étudié deux oligoéléments : le cuivre et le manganèse.

En 1967, nous avons publié les premiers résultats obtenus sur les teneurs en cobalt de foins et herbes récoltés dans le département du Finistère, en corrélation avec la richesse des sols, et attiré l'attention sur le fait qu'un certain nombre d'échantillons d'herbes, au stade pâture, avaient des teneurs en cobalt inférieures au seuil zootechnique de 0,07 p.p.m. (COPPENET et CALVEZ, 1967).

De 1964 à 1966, la Maison de l'élevage du Finistère, sous la direction de J. HOURMANT, a effectué un important travail d'enquête sur les causes de l'infertilité des vaches laitières. Ce travail a porté sur 140 élevages comportant entre 10 et 20 laitières chacun ; il était tout spécialement orienté vers l'étude des facteurs d'ordre nutritionnel et de l'intensification fourragère. Il est utile de mentionner ici quelques conclusions se rapportant à la nutrition minérale.

Il s'agit, notamment, de la teneur en oligoéléments des fourrages, ces oligoéléments étant limités aux trois que nous avons dosés dans les fourrages et les sols : Mn, Cu, Co. Ces éléments ont, malheureusement, été pris en bloc et non étudiés séparément, mais nous avons de bonnes raisons de penser que l'influence du cobalt est l'une des plus importantes. Pour un effectif de 2 730 vaches laitières, on a constaté 45,6 p. 100 des cas de très bonne fertilité lorsque les teneurs des fourrages sont faibles et 52,8 p. 100 lorsque les teneurs des fourrages sont bonnes. Ces différences sont, naturellement, significatives. Les critères analytiques choisis étant : fourrages pauvres : Mn < 30 p.p.m., Cu < 4 p.p.m., Co < 0,07 p.p.m. ; fourrages riches : Mn > 80 p.p.m., Cu > 6 p.p.m., Co > 0,15 p.p.m. Parallèlement, la diminution des cas graves d'infertilité est assez nette puisqu'elle passe de 21,5 à 15,9 p. 100 (MESSAGER, 1970).

Il a été calculé aussi qu'aux faibles teneurs d'oligoéléments dans les fourrages, la fertilité est particulièrement mauvaise dans les exploitations intensives utilisant plus de 200 unités d'azote par hectare et par an. Dans ce cas, 29,7 p. 100 des vaches ont de très graves problèmes de fécondation contre 20,3 p. 100 seulement dans les exploitations utilisant moins de 100 unités d'azote.

Nous verrons plus loin que l'ammonitrate accroît, généralement, la teneur en

cobalt du ray-grass mais ceci n'infirme pas le fait que l'intensification azotée pose, par ailleurs, des problèmes de complémentation minérale.

L'expérimentation, dans certains élevages, d'un complément minéral bien pourvu en magnésium et oligoéléments a permis dans ces exploitations intensives d'améliorer très significativement la fertilité. Enfin, l'enquête a montré qu'avec de bonnes teneurs en oligoéléments dans les fourrages, l'amélioration de la fertilité par un complément minéral n'est pas significative.

Le présent mémoire précise les teneurs en cobalt de la matière sèche du ray-grass d'Italie au cours de ses stades physiologiques successifs, l'influence de l'époque de l'année, de la nature du sol, de la fertilisation, et enfin, de l'apport de sels de cobalt au sol ou en pulvérisations sur la plante. Ces divers résultats contribueront à une meilleure connaissance de la valeur minérale des plantes fourragères et permettront plus de précision dans la formulation des compléments minéraux, tout en apportant une réponse assez précise sur les possibilités d'enrichissement en cobalt de la plante à pâturer.

Des expérimentations parallèles sont poursuivies actuellement sur le maïs destiné à l'ensilage en vue de sa consommation par des vaches laitières ou par des taurillons à viande.

## TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET MATÉRIEL UTILISÉ

Les expérimentations ont porté sur le ray-grass d'Italie, sauf un essai sur l'influence de la fumure azotée et un essai sur les pulvérisations foliaires qui ont porté sur le ray-grass anglais, avec des résultats, d'ailleurs, tout à fait analogues. Les échantillons d'herbe au stade pâture ou de plantes épiées prélevés dans les parcelles d'expériences sont, autant que possible, coupés à la faucille et transportés proprement au laboratoire. La motofaucheuse à coupe frontale, souvent employée en expérimentation agronomique, peut occasionner des souillures de terre au moment du passage des roues ; quant aux échantillons de foins prélevés dans les bottes une fois engrangées à la ferme, ils sont, bien entendu, toujours plus ou moins souillés par la terre ou la poussière de terre.

Les échantillons sont séchés à l'étuve en vue de leur broyage, sans lavage préalable. Ce lavage permettrait l'élimination d'une grande partie de la terre susceptible d'être présente, mais, en revanche, il risquerait de provoquer des pertes de divers éléments minéraux dont le cobalt. Nous reverrons ce point au dernier chapitre consacré aux pulvérisations foliaires.

Les sols contenant 100 à 200 fois plus de cobalt que les ray-grass, il y a exagération du résultat analytique par le cobalt qu'ils apportent comme l'a montré l'un d'entre nous (Moré, 1969):

Cinq grammes de terre par kilogramme de foin peuvent fausser les résultats par excès de 15 à 50 p. 100 suivant la richesse du sol en cobalt soluble dans la solution chlorhydrique de reprise des cendres végétales (soit dans HCl 1/4), ce cobalt soluble dans l'acide chlorhydrique représentant environ 85 p. 100 du cobalt total. Nous pensons que cette quantité de terre, 5 g par kilogramme, correspond déjà à des foins très sales, mais divers auteurs ont signalé des contaminations plus fortes et dépassant parfois 10 g par kilogramme de matière sèche des fourrages (Naught et Paul, 1939 ; Stanton et Kidson, 1939).

Healy (1968) en dosant le titane par fluorescence X dans les fèces a trouvé qu'un bovin pouvait ingérer, dans les conditions de la Nouvelle-Zélande, de 200 à 1 000 livres de terre par an. Ces quantités correspondent à 250 g et à 1 250 g de terre par jour, cette dernière valeur paraissant particulièrement élevée. Une question intéressante est alors posée : les ruminants utilisent-ils les oligoéléments du sol, et, dans ce cas précis, le cobalt ?

Healy, Mc Cabe et Wilson (1970) ont fait une expérience qui permettrait de répondre par l'affirmative : deux moutons, après ingestion de 100 g de sol ayant adsorbé une solution de quatre isotopes radioactifs de Co, Mn, Se et Zn, sont abattus au bout de 10 jours, la quantité de cobalt absorbée par les animaux est de 1 p. 100 du cobalt retenu par le sol. Cette proportion correspond à ce que l'on obtient à partir d'une administration orale d'un sel de cobalt à un ruminant.

Si nous calculons la dose journalière de cobalt contenue dans 500 g d'une terre granitique à 3 p.p.m. de cobalt total, nous constatons qu'elle est de 1,5 mg, soit sensiblement l'ordre de grandeur des besoins journaliers d'un gros bovin. S'agissant de cobalt total, voyons la solubilité de ce cobalt des sols dans trois réactifs faibles :

| | |
|---|---|
| 1° acide acétique à 2,5 p. 100 ajusté à pH = 5 (pH le plus acide rencontré dans le rumen) ..... | 0,5 à 2 % |
| 2° acide acétique 2,5 p. 100 ajusté à pH = 2,5 ..... | 5,0 à 6,0 % |
| 3° acide chlorhydrique N/100 à pH = 2 (pH rencontré dans la caillette) ..... | 8,0 à 10,0 % |

Ces pourcentages de solubilité sont faibles et expliquent difficilement la mise en solution d'une fraction appréciable des 1,5 mg de cobalt journalier. Cependant, en 1934, RIGG et ASKEW ont guéri des moutons atteints de « bush sickness » en leur faisant ingérer 20 g de sol par semaine, pendant 6 mois. De toute manière, notre intention est seulement de donner ici quelques éléments sur la solubilité du cobalt des sols dans divers réactifs faibles et d'évoquer le problème des contaminations des fourrages par la terre.

Les sols du département du Finistère, sur lesquels a porté ce travail, sont formés, essentiellement, sur des roches granitiques d'âge hercynien et sur des schistes primaires. Leur teneur en matière organique est élevée (5 à 7 p. 100), alors que leur teneur en argile est plutôt faible : 10 à 12 p. 100 sur granite, 15 à 20 p. 100 sur schiste. Tous dépourvus de calcaire, le chaulage a été indispensable pour leur mise en valeur et, aujourd'hui, les parcelles cultivées ont des pH ($H_2O$) compris entre 5,5 et 6,5 (COPPENET, 1970).

## MÉTHODES DE DOSAGE

Le dosage du cobalt dans les végétaux a été effectué par colorimétrie au sel nitroso-R-. Après incinération de la poudre végétale à 700°, les cendres sont reprises par de l'acide chlorhydrique au 1/4, puis le cobalt en est extrait sous forme de complexe cobalt-α-nitroso-β-naphtol en phase chloroformique. La colorimétrie suit la minéralisation nitro-perchlorique de cet extrait. L'élimination du fer a été pratiquée, dans le cas d'échantillons très souillés par la terre ou particulièrement riches en cet élément, selon le mode opératoire établi par l'un d'entre nous (MORÉ, 1969).

Le dosage du cobalt soluble des sols a été fait après agitation, pendant 18 h, de 10 g de terre dans 250 ml d'acide acétique à 2,5 p. 100 en volume (pH = 2,5). La technique colorimétrique décrite ci-dessus s'adapte aux extraits acétiques des sols.

Quant au cobalt total, il est dosé également selon cette technique, après attaque perchlorofluorhydrique (1 ml d'acide perchlorique + 5 ml d'acide fluorhydrique pour 500 mg de terre), reprise par HCl 8 N et élimination du fer par l'éther isopropylique.

## RÉSULTATS OBTENUS

### I. — *Influence du stade physiologique*

Cette étude a été poursuivie, d'une part, par l'analyse de 7 prélèvements successifs échelonnés depuis le stade feuillu jeune jusqu'au stade graines mûres et, d'autre part, en comparant seulement deux stades pour des échantillons provenant de diverses parcelles : le stade pâture normal et le stade épiaison.

#### 1. *Diminution de la teneur en cobalt depuis le stade feuillu jeune jusqu'au stade graines mûres.*

L'expérience a été conduite au champ d'expérience de la Station d'Agronomie en 1969 et 1970 sur des ray-grass de seconde année de la variété tétraploïde non

alternative (Tétrone). Ces ray-grass, semés en avril et exploités quatre fois au stade pâture au cours de la 1re année, sont récoltés 6 ou 7 fois en 2e année au fur et à mesure de l'avancement de leur maturité.

En 1969, par exemple, le 1er stade (pâture précoce) a été récolté le 28 avril et le dernier stade (graines mûres) le 4 juillet. Un second cycle a été suivi à partir des repousses de la coupe du 28 avril, le 1er stade étant fauché le 16 mai, le dernier stade (début de dessiccation) le 4 juillet. Les parcelles ont quelques mètres carrés seulement, et à chaque stade un prélèvement de 1 kg est effectué à la faucille.

Il se trouve que l'expérience a été poursuivie sur des parcelles assez bien pourvues en $K_2O$ échangeable (150 mg/kg) et ayant, de plus, reçu 150 kg $K_2O$ par hectare du KCl, le 28-4-69, ainsi que sur des parcelles laissées sans engrais potassique depuis plusieurs années et dont la teneur en $K_2O$ est très basse (50 à 70 mg/kg). Par ailleurs, le sol présente un pH voisin de 6,0 avec une très bonne teneur en $P_2O_5$ citrique (400 mg/kg).

La figure 1 donne les teneurs en cobalt de la matière sèche de ces ray-grass.

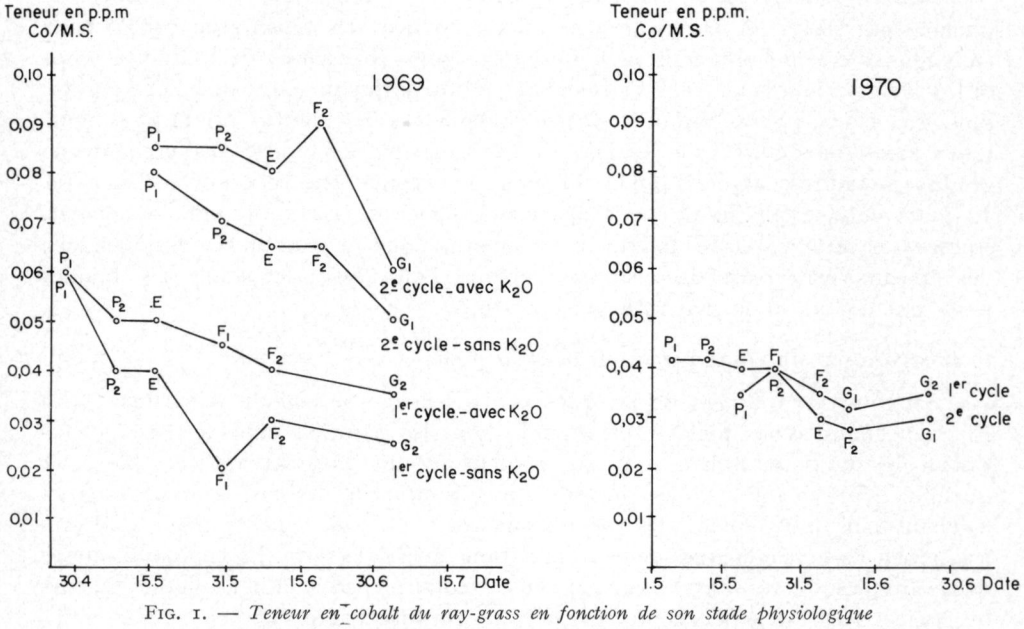



FIG. 1. — *Teneur en cobalt du ray-grass en fonction de son stade physiologique*

$P_1$ = pâturage précoce
$P_2$ = pâturage normal
E = début épiaison
$F_1$ = début floraison
$F_2$ = fin de floraison
$G_1$ = début dessiccation
$G_2$ = plante sèche

Les stades de prélèvement ont été, dans toute la mesure du possible, ceux définis ci-dessous :

1. Stade $P_1$, pâturage précoce d'une hauteur de 10 cm
2. Stade $P_2$, pâturage normal d'une hauteur de 20 cm
3. Stade E, début de l'épiaison avec 50 p. 100 des épis visibles
4. Stade $F_1$, début de la floraison

5. Stade $F_2$, fin de la floraison
6. Stade $G_1$, début de dessiccation des plantes
7. Stade $G_2$, plantes desséchées, graines mûres.

Pour les six tracés de la figure 1, nous voyons clairement une chute progressive des teneurs en cobalt lorsque nous passons du stade $P_1$ au stade $G_1$ ou $G_2$. Cette diminution est toujours d'au moins 25 p. 100, mais peut atteindre 50 p. 100. Le cobalt suit donc les mêmes lois que les autres éléments minéraux pour lesquels ce phénomène est déjà bien connu. Nous avons effectivement dosé sur ces échantillons P, K, Ca, Mg, Na, Cu et constaté des diminutions de teneurs du même ordre de grandeur. Le manganèse, par contre, donne lieu à des diminutions de teneur beaucoup moins fortes. Au prochain paragraphe, nous aurons une confirmation de l'appauvrissement en cobalt des graminées, au fur et à mesure de l'avancement de la maturité physiologique d'un cycle donné, en comparant seulement deux stades : le stade pâturage normal et le stade auquel il serait nécessaire de faucher pour la transformation en foin.

Dans la bibliographie, nous avons noté trois publications qui confirment ce phénomène. DATTA et DATTA-BISWAS (1951) donnent les teneurs en cobalt pour trois stades (jeune, préfloraison, floraison) et pour 16 espèces de graminées. Les ordres de grandeur sont respectivement : 0,30 à 0,35 p.p.m. Co, 0,09 à 0,12 p.p.m., puis 0,05 à 0,09 p.p.m. MAROCKE (1958) souligne que les plantes jeunes présentent une richesse plus élevée que les plantes âgées puisque les prairies à dominante de graminées fournissent 0,22 p.p.m. Co pour une coupe effectuée après 1 mois et 12 jours et 0,58 p.p.m. Co pour une coupe effectuée après 15 jours seulement. FLEMING et MURPHY (1968) indiquent sur un graphique, et pour un ray-grass anglais, des teneurs en cobalt décroissantes lorsque l'on passe du stade 4-5 feuilles (0,07 p.p.m.) au stade maturité (0,03 p.p.m.).

2. *Comparaison du stade pâture et du stade foin.*

Au cours de tournées de prospection dans la moitié sud du département du Finistère, nous avons prélevé, au hasard, dans des parcelles cultivées, des échantillons de ray-grass italien, soit au moment où un pâturage est possible, soit quelques jours avant la coupe du foin. Dans la majorité des cas, les deux groupes d'échantillons proviennent des mêmes champs. Ces prélèvements étant effectués à la main, ils sont indemnes de contaminations dues à la terre. La comparaison des deux groupes de résultats nous permet de confirmer la diminution des teneurs observées dans l'expérience précédente. Une tournée a été faite en région granitique et une autre en région schisteuse.

— Région granitique :

*a*) stade pâture (début mai), 10 échantillons :
moyenne ***0,045*** *p.p.m. Co;* extrêmes 0,02 et 0,08 p.p.m. ;

*b*) stade épiaison (début juin), 10 échantillons :
moyenne ***0,030*** *p.p.m. Co;* extrêmes 0,02 et 0,05 p.p.m.

— Région schisteuse :

*a*) stade pâture (début mai), 10 échantillons :
moyenne ***0,110*** *p.p.m. Co;* extrêmes 0,045 et 0,220 p.p.m. ;

*b*) stade épiaison (début juin), 10 échantillons :

moyenne *0,055 p.p.m. Co ;* extrêmes 0,030 et 0,090 p.p.m.

Ces chiffres montrent qu'une graminée, au stade feuillu, peut être suffisamment pourvue en cobalt pour les ruminants (teneur supérieure à 0,07 ou 0,08 p.p.m.), alors qu'au stade épiaison, elle aura une teneur inférieure au seuil.

3. *Comparaison des herbes prélevées au moment du pâturage et des mêmes herbes une fois épiées et transformées en foin à la ferme.*

C'est au cours de l'enquête sur la stérilité bovine, organisée par la Maison de l'élevage du Finistère et dont nous avons parlé dans l'introduction de ce mémoire, que nous avons reçu les échantillons permettant cette comparaison. Les herbes, prélevées au moment où les animaux allaient pâturer, étaient coupées à la main et parvenaient au laboratoire sans contact avec le sol susceptible de les souiller. Les foins, par contre, étaient prélevés dans les bottes une fois engrangées, donc après fanage et ramassage mécaniques occasionnant des souillures importantes par la terre et la poussière de terre. Les résultats de ces dosages ont déjà été publiés par COPPENET et CALVEZ (1967). Les voici à nouveau, après avoir rappelé que s'il ne s'agit pas toujours de ray-grass italien ; cette graminée constitue plus de 80 p. 100 des échantillons, le reste provenant du ray-grass anglais et de quelques dactyles et fétuques.

— *Régions granitiques :*

*a*) stade pâture (40 échantillons)

moyenne *0,097* ± 0,045 p.p.m. Co ; extrêmes 0,05 et 0,24 p.p.m. ;

*b*) stade foin (90 échantillons)

moyenne *0,155* ± 0,078 p.p.m. Co ; extrêmes 0,05 et 0,35 p.p.m.

— *Régions schisteuses :*

*a*) stade pâture (50 échantillons)

moyenne *0,141* ± 0,10 p.p.m. Co ; extrêmes 0,05 et 0,48 p.p.m. ;

*b*) stade foin (126 échantillons)

moyenne *0,200* ± 0,12 p.p.m. Co ; extrêmes 0,04 et 0,60 p.p.m.

Contrairement à ce que nous avons vu précédemment, les foins sont plus riches en cobalt que les herbes au stade pâture. Ce fait est anormal et ne peut s'expliquer que par les souillures de terre faussant les résultats par excès, d'abord par le cobalt apporté, mais aussi à cause du fer contenu dans la terre (à cette époque, nous n'avions pas encore mis au point l'élimination du fer au cours du dosage).

## II. — *Influence de la saison pour un même stade physiologique*

En récoltant le ray-grass à un même stade physiologique, il est possible d'étudier l'influence de l'époque de l'année, à laquelle vient s'ajouter l'influence du vieillissement de la souche de la graminée. Nous avons étudié ce phénomène pour le stade pâturage, qui est assez bien définissable et qui présente une grande importance pra-

tique. Le climat océanique du Finistère permet jusqu'à 5 exploitations en pâturage (hauteur de l'herbe environ 20 cm), même pour un ray-grass d'Italie semé vers le 1er avril. La figure 2 donne les teneurs en cobalt de ces exploitations successives pour trois essais de plein champ et deux essais en pots.

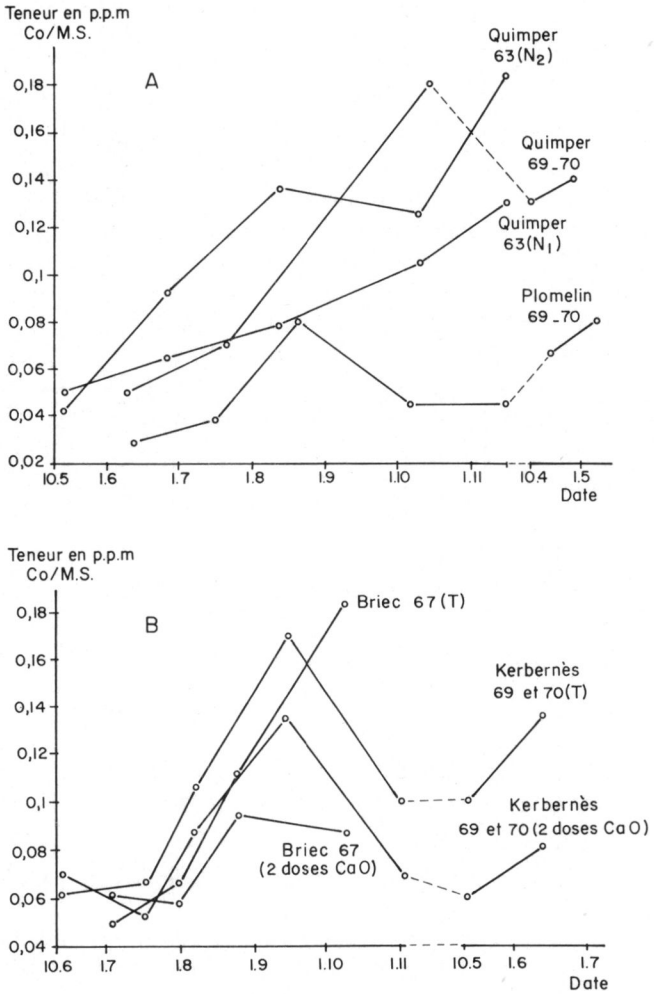



FIG. 2. — *Influence de l'époque de l'année sur la teneur en cobalt de ray-grass au stade pâture*

A. — Essais au champ : « Quimper 69 et 70 » = parcelles témoins d'un essai d'enrichissement par le sulfate de cobalt mis en couverture (semis 2-4-69) ; « Plomelin 69 et 70 » = parcelles témoins d'un autre essai d'enrichissement en cobalt (semi 1-4-69) ; « Quimper 63 » = ray-grass anglais en seconde année à deux niveaux azotés.

B. — Essais en pots : « Briec 67 » = essai en pots destiné à voir l'action du $CaCO_3$ sur l'absorption du cobalt ; il en est de même pour « Kerbernès 69 et 70 ».

De l'ensemble des tracés, il ressort que la teneur est la plus faible à la première coupe pour s'élever ensuite progressivement dans le courant de l'année. Dans l'essai au champ « Plomelin 69 », la teneur très élevée du mois d'août correspond à une

période de sécheresse marquée, et il est possible que ce soit là une explication partielle, comme cela a été signalé par certains chercheurs. Pour deux tracés correspondant aux essais en pots, nous constatons une chute importante de la teneur à la coupe de novembre sans qu'il nous soit possible de donner une explication.

Nous sommes d'autant plus fondés à conclure à cet accroissement progressif des teneurs en cobalt au fur et à mesure de l'avancement de la saison que nous avons déjà mis en évidence ce phénomène pour d'autres minéraux et pour d'autres graminées (COPPENET, 1964). Les expériences de plein champ citées à la figure 2 A ont également permis de conclure à un accroissement progressif des teneurs en Mn, Cu, Na, Mg et Ca alors que, pendant le même temps, la teneur en K subit une variation inverse. La figure 2 A nous indique aussi la tendance pour la seconde année d'exploitation des rays-grass italiens, à savoir que la 1re coupe de 2e année serait plus riche que la 1re coupe de 1re année, et qu'ensuite, il y aurait encore accroissement de la richesse.

Dans la bibliographie, on trouve un certain nombre de travaux sur les variations des teneurs en cobalt des fourrages suivant les saisons, mais il s'agit, le plus souvent, de prairies naturelles constituées d'un mélange de plusieurs espèces dont les proportions peuvent varier d'une époque de l'année à l'autre. COMHAIRE (1967) dans son importante mise au point : « *Le cobalt pour les êtres vivants* » note que les auteurs ont souvent mentionné que les herbes sont plus riches en automne qu'au printemps, mais que ceci n'est pas une règle générale. ASKEW et MAUNSELL (1937) observent pour les pâtures de l'île du Sud (Nouvelle Zélande) une décroissance des teneurs avec l'avancement de la saison pour arriver à une teneur très basse en fin d'automne, CORNER et SMITH (1938) une teneur plus faible en été qu'au printemps pour les pâtures d'Écosse, MC NAUGHT et PAUL (1939), pour l'île du Nord (Nouvelle-Zélande), un accroissement des teneurs en fin d'automne et hiver et une décroissance au printemps et en été lorsque la croissance est maximale. REITH *et al.* (1964), travaillant sur des mélanges de ray-grass anglais et de dactyle, écrivent que les variations des teneurs en cobalt dans les différentes coupes de l'année ne sont pas claires. Enfin, FLEMING (1970) a expérimenté sur du ray-grass anglais pur et trouvé une décroissance progressive de la teneur en cobalt pour 6 coupes de l'année 1967 (0,06 à 0,03 p.p.m.) mais il pense que ce phénomène est peut-être partiellement dû à la fertilisation azotée.

### III. — *Influence de la teneur en cobalt du sol sur la teneur en cobalt du ray-grass*

Cette étude a été poursuivie dans le département du Finistère de deux façons différentes :

1° au niveau de la parcelle cultivée ;

2° au niveau d'un prélèvement ponctuel du sol et de l'herbe correspondante.

1. *Au niveau de la parcelle cultivée.*

Nous avons, en somme, comparé les herbes provenant de régions granitiques et les herbes provenant de régions schisteuses sachant que, dans le premier cas, la moyenne des teneurs des sols en cobalt extrait par l'acide acétique à 2,5 p. 100 est de 0,28 p.p.m. et que, dans le second cas, elle est de 0,56 p.p.m. (60 sols de chaque

catégorie) (COPPENET et CALVEZ, 1967). Les échantillons de ray-grass au stade pâture sont ceux qui proviennent de l'enquête sur la stérilité bovine dont nous avons déjà parlé et donné des résultats au chapitre précédent. Voici les moyennes :

Ray-grass sur sols granitiques (40 échantillons) :

*0,097 p.p.m.* ± 0,045 p.p.m.

Ray-grass sur sols schisteux (50 échantillons) :

*0,141 p.p.m.* ± 0,10 p.p.m.

Ces deux familles de teneurs sont significativement différentes pour P = 0,05, il s'agit donc bien de l'effet de la teneur en cobalt des sols.

2. *Au niveau ponctuel.*

Dans une parcelle portant un ray-grass, au stade épiaison, nous prélevons un échantillon de 1 kg des parties aériennes dans un cercle de 50 cm de diamètre, puis l'échantillon de sol correspondant, grâce à 6 ou 8 sondages dans la couche arable ; nous délimitons ainsi une sorte de vase de végétation. Nous avons constitué ainsi 80 couples (sol-plante) à raison de 20 par année entre 1967 et 1970 et pour moitié en terrain granitique, pour moitié en terrain schisteux (schistes carbonifères). La zone granitique englobe les communes du sud-Finistère de Plomelin, Pluguffan, Plogastel Saint-Germain, Plonéour-Lanvern et Tréméoc ; la zone schisteuse, les communes de Châteaulin, Saint-Ségal, Pleyben, Lothey, Gouézec, situées dans le centre du département.

Les résultats ont été les suivants :

*Teneurs en cobalt acétique des sols* (extraits acétique à 2,5 p. 100, pH = 2,5) :

granites 0,24 ± 0,13 p.p.m.
schistes 0,84 ± 0,35 p.p.m.

(ces deux séries sont significativement différentes pour P = 0,001).

*Teneurs en cobalt des ray-grass au stade épiaison :*

sur granites 0,032 ± 0,016 p.p.m.
sur schistes 0,075 ± 0,036 p.p.m.

(ces deux séries sont significativement différentes pour P = 0,001).

La liaison sol-plante, en regroupant les deux catégories, s'exprime par l'équation de régression linéaire $y = 0{,}052\ x + 0{,}027$ (HS) (fig. 3). Le coefficient de corrélation est $r = 0{,}536$. En fait, ce coefficient de corrélation très satisfaisant est obtenu par suite de l'existence de deux groupes de sols et de végétaux bien distincts, car si nous considérons seulement le groupe « schistes », la régression n'est pas significative et le coefficient de corrélation tombe à 0,098.

Pour 40 des sols ci-dessus, nous avons déterminé le *cobalt total* et enregistré les moyennes suivantes :

— sols granitiques 2,9 ± 1,3 p.p.m.
— sols schisteux 14,2 ± 9,5 p.p.m.

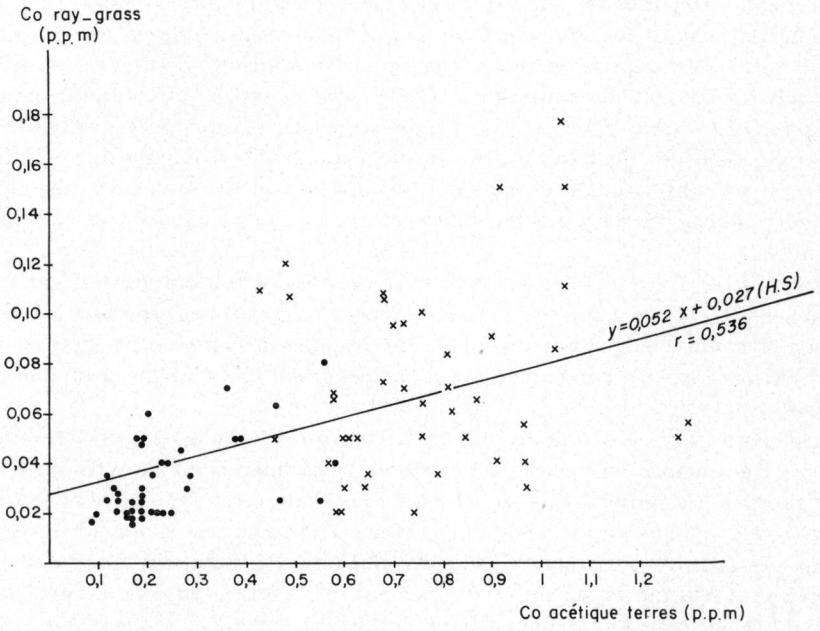



FIG. 3. — *Corrélation entre le cobalt du ray-grass et le cobalt acétique des sols*

● Granites × Schistes

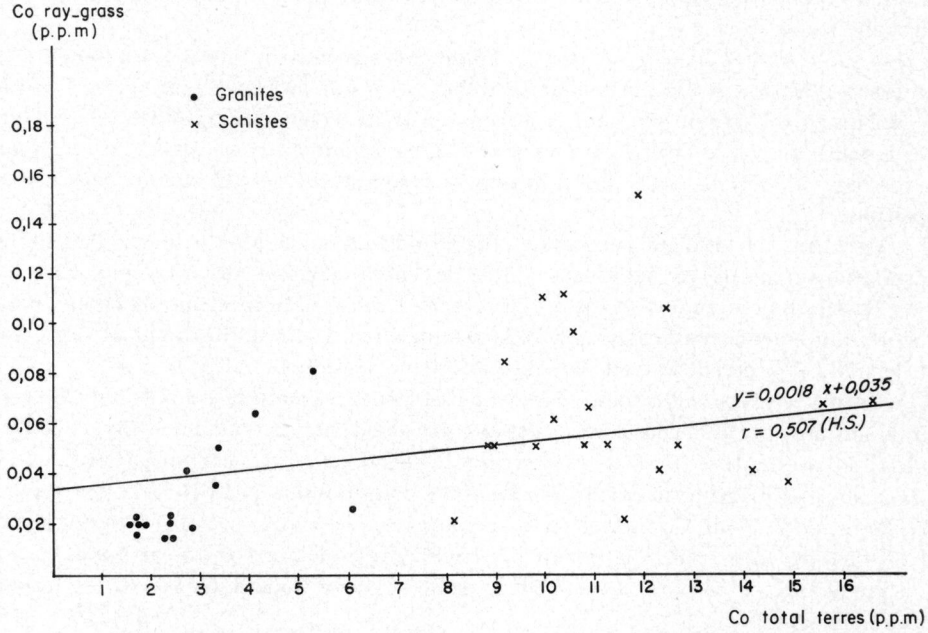



FIG. 4. — *Corrélation entre le cobalt du ray-grass et le cobalt total des sols*

Les deux catégories de sols sont également bien distinctes malgré une forte dispersion des teneurs des sols schisteux. D'une manière générale, la teneur des sols en cobalt total est comprise entre 1 et 40 p.p.m. et beaucoup d'auteurs considèrent que les sols fournissant des fourrages carencés sont ceux qui en contiennent moins de 5 p.p.m. (CHAPMAN, 1966). Il existe aussi une corrélation positive, hautement significative, entre le cobalt total des sols et le cobalt des ray-grass avec un coefficient $r = 0{,}507$ (fig. 4). Ce coefficient de corrélation est seulement légèrement inférieur à celui calculé à partir du cobalt acétique des mêmes 40 sols pour lesquels il atteint 0,601.

En définitive, que l'on dose le cobalt total des sols ou le cobalt extrait par l'acide acétique à 2,5 p. 100, on ne pourra prévoir la teneur en cobalt des végétaux correspondants que pour des conditions assez différentes les unes des autres. Une grande incertitude persistera si l'on compare des sols à l'intérieur d'un même grand type de roche-mère.

Plusieurs auteurs ont signalé que les herbes provenant de sols formés sur des roches silicatées acides ou des granites étaient particulièrement pauvres en cobalt. Voici d'abord deux publications se référant au cobalt total des sols : STANTON et KIDSON (1939) ont mis en évidence une certaine relation entre la teneur des sols et la teneur des pâtures de Nouvelle-Zélande (Nelson). Pour les sols contenant entre 0 et 2 p.p.m. Co total, la moyenne des teneurs des herbes correspondantes est de 0,04 p.p.m. (13 échantillons) ; pour les sols contenant entre 2 et 5 p.p.m. Co total, la moyenne des teneurs des herbes est 0,06 p.p.m. (11 échantillons) et, pour les sols contenant entre 5 et 20 p.p.m. Co, la moyenne des teneurs des herbes est 0,084 p.p.m. (18 échantillons). KUBOTA (1964), travaillant en Nouvelle-Angleterre (U. S. A.), a établi les corrélations qui existent entre le cobalt total du sol ($x$) et la teneur en cobalt du trèfle rouge ($y$) :

$y = 0{,}02 + 0{,}01\ x$ avec $r = 0{,}699$, hautement significatif. Lorsque la teneur du sol est voisine de 2 p.p.m., la teneur du trèfle est voisine de 0,04 p.p.m., mais, lorsque la teneur du sol atteint 5 p.p.m., la teneur du trèfle s'élève à 0,07 p.p.m. C'est pour des teneurs du sol de l'ordre de 10 p.p.m. que la teneur du trèfle atteint 0,12 p.p.m.

Voici, à présent, trois publications se référant au cobalt extrait par divers réactifs :

MITCHELL, REITH et JOHNSTON (1957) mettent en évidence un coefficient de corrélation hautement significatif entre le cobalt extrait des sols par l'EDTA 0,05 M et la teneur en cobalt du ray-grass pur. La corrélation est moins bonne, mais encore hautement significative, entre la teneur en cobalt d'un mélange de ray-grass et de trèfle et le cobalt extrait des sols par l'acide acétique à 2,5 p. 100.

REDDY et MEHTA (1961), grâce à une expérience conduite en pots et en serre sur le sorgho, ont calculé les coefficients de corrélation entre la teneur des sols (21 échantillons) et la quantité de cobalt extraite par le végétal. Pour Co extrait par HCl 0,1 N, $r = 0{,}363\,5$ (NS), pour Co extrait par l'acétate d'ammonium N à pH = 7, $r = 0{,}490\,1$ (S., P = 0,05), pour Co extrait par l'acide acétique à pH = 4,5, $r = 0{,}505\,8$ (S., P = 0,05) et, enfin, pour Co extrait par l'acide acétique à 2,5 p. 100 et à pH = 2,5, $r = 0{,}734\,7$ (S., P = 0,01). Ces résultats sont ainsi nettement en faveur du dernier mode d'extraction.

RANA et OUELLETTE (1968), utilisant l'avoine comme plante test dans un essai en serre portant sur 9 sols de la province du Québec au Canada, ont calculé les coeffi-

cients de corrélation suivants entre teneur du sol et quantité de cobalt absorbée par l'avoine : $r = 0{,}079$ (NS) si l'extraction est faite par l'acétate d'ammonium N et $r = 0{,}769$ (S) si l'extraction est faite par l'acide acétique à 2,5 p. 100.

Dans la bibliographie, nous trouvons peu d'expériences poursuivies sur le ray-grass pur, mais nous constatons que pour les prairies naturelles et pour diverses plantes, les teneurs en cobalt et les liaisons avec la teneur des sols sont assez comparables à nos résultats.

Il est certain que la teneur en cobalt d'un végétal est sous la dépendance de la quantité de cobalt contenue dans le sol, mais il est excessif de vouloir en calculer une corrélation très précise ou de proposer un réactif d'extraction tout à fait en accord avec l'absorption de la plante.

## IV. — *Influence des amendements calcaires et des engrais*

L'action des amendements calcaires et des engrais usuels, à des doses agricoles, sur la teneur en cobalt des ray-grass a été étudiée en vases de végétation pour les amendements calcaires et en plein champ pour les engrais N, P, K.

### 1. *Influence du chaulage.*

Plusieurs expériences ont déjà montré l'influence négative de l'élévation du pH des sols sur l'absorption et la teneur en cobalt des végétaux. Dans le but d'étudier et de mesurer ce phénomène dans les sols de Bretagne, qui sont tous originellement acides, nous avons effectué deux essais en vases de végétation portant chacun sur un type de sol différent.

*1er essai : sol schisteux de Briec* (1967).

Les pots, du type « Riviera », avec une réserve d'eau au fond du récipient, contiennent 7 kg de terre sèche : 2 pots témoins contenant le sol d'une parcelle de pH = 6,0, 2 pots ayant reçu chacun 6 g CaO sous forme de chaux vive et 2 pots ayant reçu chacun 12 g CaO. Ces doses de chaux correspondent approximativement à 3 tonnes et 6 tonnes CaO par hectare respectivement ; elles ont été incorporées et mélangées à toute la masse de terre des pots le 20-3-1967. La fumure phospho-potassique était apportée sous forme de phosphate bipotassique (2 g par pot)

TABLEAU I

*Influence du chaulage sur la teneur en cobalt du ray-grass italien*
(1er essai : terre schisteuse de Briec)

| | Pots témoins (pH = 6,0) | Pots chaulés dose 1 (pH = 6,7) | Pots chaulés dose 2 (pH = 7,3) |
|---|---|---|---|
| 1re coupe, 4-7-67 ..... | 0,050 p.p.m. | 0,050 p.p.m. | 0,061 p.p.m. |
| 2e coupe, 31-7-67 ..... | 0,066 — | 0,056 — | 0,058 — |
| 3e coupe, 25-8-67 ..... | 0,110 — | 0,086 — | 0,084 — |
| 4e coupe, 9-10-67 ..... | 0,183 — | 0,110 — | 0,077 — |

et la fumure azotée, de nitrate d'ammoniaque (1 g par pot) au semis et après chaque coupe effectuée au stade pâture. Le semis du ray-grass italien non alternatif (variété *Rina*) a été effectué le 19-4-67 et les coupes, les 4 juillet, 31 juillet, 25 août et 9 octobre. Le tableau 1 indique les teneurs en cobalt de la matière sèche de chacune de ces coupes (moyennes de 2 pots par traitement et par date).

La première coupe mise à part, on voit une nette diminution de la teneur en cobalt sous l'influence du chaulage.

*2e essai : sol granitique de Plomelin* (1969 et 1970).

Les pots, du type « Burgevin », non drainés, avec un système d'arrosage par le fond, contiennent chacun 11,5 kg de terre sèche : 4 pots témoins contenant le sol d'une parcelle de pH = 5,6, 4 pots ayant reçu chacun 9 g CaO (sous forme de chaux vive) et 4 pots ayant reçu chacun 18 g CaO. Ces doses de chaux correspondent aussi à 3 tonnes et à 6 tonnes CaO par ha ; elles ont été incorporées et mélangées à toute la masse de terre le 28-3-69. La fumure N, P, K a été la même que pour le 1er essai et le semis du ray-grass (variété *Tétrone*) effectué le 22-4-69. Le tableau 2 indique les teneurs en cobalt de la matière sèche des coupes effectuées, au stade pâture, pour l'année 1969 et l'année 1970, puisque l'essai a été poursuivi en seconde année (moyennes de 4 pots par traitement et par date).

TABLEAU 2

*Influence du chaulage sur la teneur en cobalt du ray-grass italien*
(2e essai : terre granitique de Plomelin)

| | Pots témoins (pH = 5,6) | Pots chaulés dose 1 (pH = 6,4) | Pots chaulés dose 2 (pH = 7,05) |
|---|---|---|---|
| 1re coupe, 13-6-69 ..... | 0,062 p.p.m. | 0,057 p.p.m. | 0,070 p.p.m. |
| 2e coupe, 18-7-69 ..... | 0,067 — | 0,047 — | 0,052 — |
| 3e coupe, 7-8-69 ..... | 0,107 — | 0,080 — | 0,087 — |
| 4e coupe, 15-9-69 ..... | 0,170 — | 0,127 — | 0,135 — |
| 5e coupe, 4-11-69 ..... | 0,100 — | 0,080 — | 0,069 — |
| 6e coupe, 12-5-70 ..... | 0,100 — | 0,067 — | 0,060 — |
| 7e coupe, 12-6-70 ..... | 0,137 — | 0,100 — | 0,080 — |
| 8e coupe, 17-7-70 ..... | 0,140 — | 0,073 — | 0,074 — |

Nous constatons également, pour ce deuxième essai et mis à part la 1re coupe, une nette chute de la teneur en cobalt sous l'influence du chaulage.

En considérant les deux essais, nous voyons que la première dose de chaux, élevant le pH de 0,7 à 0,8 unité et le portant au niveau souhaité pour les sols de cette région, provoque un abaissement de la teneur en cobalt de l'ordre de 20 p. 100. En fin d'année (1er essai) et en fin de seconde année (2e essai), la diminution de teneur atteint des pourcentages voisins de 50 p. 100 pour la deuxième dose de chaux.

Le chaulage augmentant la production de matière sèche par pot, il était intéressant de calculer les exportations de cobalt pour chaque coupe. Les résultats sont donnés dans le tableau 3 auquel on se reportera pour constater, malgré l'accroissement du rendement du ray-grass, une diminution de l'absorption globale de cobalt en exceptant la première coupe.

On peut se demander, à propos de l'influence du chaulage si le cobalt extrait des sols par l'acide acétique en fin d'expérience est diminué. Nous n'avons pas approfondi ce point, mais nous signalerons, cependant, que pour le 2e essai cité ici, il y a un léger accroissement du cobalt acétique avec le chaulage, alors que pour quatre autres sols acides chaulés, en pots, les résultats ne sont pas nets. Certains sols ne voient pas leur cobalt acétique varier alors que dans deux cas, on constate une légère diminution.

Plusieurs auteurs ont trouvé, pour diverses plantes, des chutes de teneur en cobalt du même ordre de grandeur sous l'action de l'élévation du pH des sols. Hill, Toth et Bear (1953) ont comparé les teneurs de premières coupes de luzerne récoltées sur diverses parcelles ayant reçu des doses variables de carbonate de calcium ; pour un pH du sol de 5,8 (sans apport de $CaCO_3$), la teneur est 0,12 p.p.m., elle tombe à 0,09 p.p.m. pour un pH de 6,6 et à 0,05 p.p.m. pour un pH de 7,6. Ces données sont assez comparables à celles que nous obtenons pour le ray-grass.

Mitchell (1957) signale les teneurs suivantes d'après un essai effectué en sol granitique sur ray-grass : parcelles témoins de pH = 5,4, 0,35 p.p.m.; parcelles à dose 1 de $CaCO_3$ de pH = 6,1, 0,20 p.p.m.; parcelles à dose 2 de $CaCO_3$ de pH = 6,4, 0,14 p.p.m. Pour un trèfle rouge cultivé sur les mêmes parcelles, les teneurs sont respectivement de 0,22, 0,18 et 0,12 p.p.m.

Reith et Mitchell (1964), au cours d'essais avec apports de sels de cobalt au sol, donnent les teneurs moyennes suivantes concernant des ray-grass : parcelles non chaulées (pH = 5,6) : 0,073 p.p.m. en 1958, 0,066 en 1959, 0,080 en 1960, parcelles chaulées (pH = 7,0) : 0,060 en 1958, 0,060 en 1959, 0,063 en 1960.

Rana et Ouellette (1968), à propos de l'essai poursuivi en serre sur avoine signalé au chapitre précédent, donnent les teneurs en cobalt de l'avoine provenant de pots chaulés ou non [$Ca(OH)_2$ à raison de 1 120 kg/ha]. Voici quelques exemples concernant quatre sols différents :

1. pH 5,2 : 0,08 p.p.m. ; pH 5,5 : 0,02 p.p.m.
2. pH 4,6 : 0,04 p.p.m. ; pH 4,9 : 0,02 p.p.m.
3. pH 5,1 : 0,06 p.p.m. ; pH 5,4 : 0,03 p.p.m.
4. pH 6,2 : 0,05 p.p.m. ; pH 6,6 : 0,03 p.p.m.

Dans cette expérience, les chutes des teneurs en cobalt sont très importantes même pour un relèvement du pH de 0,3 unité seulement.

2. *Influence des engrais azotés.*

A l'occasion de l'expérimentation de diverses doses d'engrais azotés sur ray-grass purs, nous avons analysé la matière sèche des diverses coupes effectuées au stade pâture. Les résultats obtenus, pour trois essais où l'engrais azoté était le nitrate d'ammoniaque (ammonitrate à 33,5 p. 100 d'azote), sont donnés ci-dessous :

*1er essai : Plomelin 1969.* — Ferme expérimentale de la Maison de l'élevage du

TABLEAU 3

*Action du chaulage sur les teneurs et les quantités de cobalt contenues dans la récolte*
(2e essai : Plomelin, 1969-1970)

| | Pots témoins (pH = 5,6) | | | Pots chaulés : dose 1 (pH = 6,4) | | | Pots chaulés : dose 2 (pH = 7,05) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MS (g/pot) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (µg/pot) | MS (g/pot) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (µg/pot) | MS (g/pot) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (µg/pot) |
| 1re coupe, 13-6-69 ..... | 32,5 | 0,062 | *2,01* | 35,0 | 0,057 | *1,99* | 40,0 | 0,070 | *2,80* |
| 2e coupe, 18-7-69 ..... | 29,0 | 0,067 | *1,94* | 32,0 | 0,047 | *1,50* | 37,5 | 0,052 | *1,95* |
| 3e coupe, 7-8-69 ..... | 19,5 | 0,107 | *2,08* | 19,5 | 0,080 | *1,56* | 21,0 | 0,087 | *1,82* |
| 4e coupe, 15-9-69 ..... | 24,5 | 0,170 | *4,16* | 25,5 | 0,127 | *3,23* | 26,5 | 0,135 | *3,57* |
| 5e coupe, 4-11-69 ..... | 20,0 | 0,100 | *2,00* | 19,0 | 0,080 | *1,52* | 23,0 | 0,069 | *1,58* |
| 6e coupe, 12-5-70 ..... | 18,5 | 0,100 | *1,85* | 19,0 | 0,067 | *1,27* | 21,0 | 0,060 | *1,26* |
| 7e coupe, 12-6-70 ..... | 14,0 | 0,137 | *1,91* | 14,0 | 0,100 | *1,40* | 13,0 | 0,080 | *1,04* |
| 8e coupe, 17-7-70 ..... | 9,0 | 0,140 | *1,26* | 8,0 | 0,073 | *0,55* | 9,0 | 0,074 | *0,66* |

Finistère en collaboration avec le bureau du S. P. I. E. A. de Brest. Sol sablo-humifère d'origine granitique, de pH 6,2, riche en éléments fertilisants. Variété « *Tétrone* », semée le 1er avril et exploitée cinq fois dans l'année avec, au semis et immédiatement après chaque coupe, 0, 25, 50 ou 75 unités d'azote, soit au total : 0, 125, 250, 375 unités d'azote. Le tableau 4 donne, pour chaque traitement et pour chaque date, la moyenne des teneurs des ray-grass de six parcelles élémentaires.

TABLEAU 4

*Influence du nitrate d'ammoniaque sur la teneur en cobalt du ray-grass italien*
(1er essai)

| | Témoin | 25 N | 50 N | 75 N |
|---|---|---|---|---|
| 1re coupe, 12-6-69 ..... | 0,036 p.p.m. | 0,025 p.p.m. | 0,030 p.p.m. | 0,025 p.p.m. |
| 2e coupe, 16-7-69 ..... | 0,037 — | 0,038 — | 0,050 — | 0,045 — |
| 3e coupe, 20-8-69 ..... | 0,107 — | 0,163 — | 0,166 — | 0,128 — |
| 4e coupe, 6-10-69 ..... | 0,055 — | 0,057 — | 0,057 — | 0,066 — |
| 5e coupe, 27-11-69 ..... | 0,047 — | 0,046 — | 0,051 — | 0,053 — |
| Moyennes ..... | 0,056 — | 0,066 — | 0,071 — | 0,063 — |

L'ammonitrate provoquerait ainsi une légère chute de la teneur en cobalt à la 1re coupe mais peu de variations à la 5e, alors qu'aux 2e, 3e et 4e coupes, l'accroissement des teneurs est assez important puisque l'indice, pour la forte dose, passe à 1,2 par rapport au témoin. Toutefois, cet accroissement n'est pas significatif.

Connaissant la production de matière sèche, nous pouvons calculer, pour chaque coupe, la quantité de cobalt exportée par hectare (tabl. 5). Les rendements du témoin étant multipliés par 3,16 pour la plus forte dose d'engrais azoté, l'exportation est, elle, multipliée par 3,67 puisque 4 coupes sur 5 sont plus riches que le témoin.

*2e essai : Quimper 1963.* — Terrain de la Station d'Agronomie d'origine granitique recevant peu de fumier et donnant lieu à de fortes actions des engrais azotés. Semis du ray-grass anglais de la variété « Melle pâture » en avril 1962, doses uniformes d'engrais azotés, avec trois coupes au cours de la première année, puis différenciation des doses d'azote en 1963. Il y avait 3 traitements : 0, dose 1 et dose 2 d'ammonitrate. La dose 1 correspondait à 200 unités pour l'année, à savoir 60 en février, 40 après chacune des deux premières coupes et 30 après chacune des deux dernières. La dose 2 est le double de la dose 1.

Le tableau 6 donne, pour chaque dose d'azote et pour chaque date, la moyenne des teneurs des ray-grass de deux parcelles élémentaires.

Comme pour le 1er essai, l'ammonitrate provoque une diminution des teneurs à la 1re coupe. A la 5e coupe (mois de décembre), on observe aussi une diminution mais aux 2e, 3e et 4e coupes, il y a un accroissement très important des teneurs, l'indice pour la forte dose passe à 2,6 et 3,0 par rapport au témoin. Les productions annuelles de matière sèche de ce ray-grass étant respectivement de 2,46 t/ha (Témoin), 9,82 t/ha (dose 1) et 15,23 t/ha (dose 2), on conçoit que, dans ces conditions, les exportations de cobalt soient sensiblement décuplées.

TABLEAU 5

*Accroissements des exportations de cobalt sous l'action du nitrate d'ammoniaque*

| | Témoin | | | 25 N | | | 50 N | | | 75 N | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MS (t/ha) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (g/ha) | MS (t/ha) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (g/ha) | MS (t/ha) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (g/ha) | MS (t/ha) | Teneur en p.p.m. Co | Exportation (g/ha) |
| 1re coupe ..... | 1,58 | 0,036 | *0,056 9* | 2,48 | 0,025 | *0,062 0* | 3,15 | 0,030 | *0,094 5* | 3,39 | 0,025 | *0,084 7* |
| 2e coupe ..... | 0,90 | 0,037 | *0,033 3* | 2,18 | 0,038 | *0,082 8* | 3,15 | 0,050 | *0,157 5* | 3,63 | 0,045 | *0,163 3* |
| 3e coupe ..... | 0,75 | 0,107 | *0,080 2* | 1,48 | 0,163 | *0,241 2* | 2,16 | 0,166 | *0,358 5* | 2,69 | 0,128 | *0,344 3* |
| 4e coupe ..... | 0,50 | 0,055 | *0,027 5* | 1,24 | 0,057 | *0,070 7* | 1,91 | 0,057 | *0,108 9* | 2,25 | 0,065 | *0,146 2* |
| 5e coupe ..... | 0,57 | 0,047 | *0,026 8* | 1,25 | 0,046 | *0,057 5* | 1,66 | 0,051 | *0,084 6* | 1,63 | 0,053 | *0,086 4* |
| Total..... | 4,30 | | *0,224 7* | 8,63 | | *0,514 2* | 12,0 | | 0,804 0 | 13,6 | | *0,824 9* |
| Indice ..... | 1 | | 1 | 2,0 | | 2,28 | 2,79 | | 3,57 | 3,16 | | 3,67 |

TABLEAU 6

*Influence du nitrate d'ammoniaque sur la teneur en cobalt du ray-grass anglais*
(2e essai : Quimper, 1963)

| | Témoin | Dose 1 | Dose 2 |
|---|---|---|---|
| 1re coupe, 14-5-63 ..... | 0,081 p.p.m. | 0,050 p.p.m. | 0,042 p.p.m. |
| 2e coupe, 26-6-63 ..... | 0,065 — | 0,065 — | 0,092 — |
| 3e coupe, 12-8-63 ..... | 0,052 — | 0,078 — | 0,136 — |
| 4e coupe, 10-10-63 ..... | 0,042 — | 0,104 — | 0,125 — |
| 5e coupe, 12-12-63 ..... | 0,211 — | 0,130 — | 0,183 — |

*3e essai : Fouesnant 1970.* — Domaine du Lycée agricole de Bréhoulou. C'est au cours d'une expérience sur l'enrichissement en phosphore du ray-grass italien par les engrais phosphatés appliqués en couverture que ces dosages ont été effectués et que nous avons pu comparer deux niveaux d'ammonitrate : 50 et 75 unités.

*1re coupe*, au stade pâture, le 8-4-70 :
moyenne de 16 parcelles (50 N) : 0,058 p.p.m. Co ;
moyenne de 16 parcelles (75 N) : 0,062 p.p.m. Co.

*2e coupe*, au stade épiaison le 3-6-70 :
moyenne de 8 parcelles (50 N) : 0,044 7 p.p.m. Co ;
moyenne de 8 parcelles (75 N) : 0,047 0 p.p.m. Co.

Ces différences ne sont pas significatives, mais elles prouvent que la forte dose d'azote n'a pas diminué la teneur en cobalt, ce qui corrobore les deux essais précédents.

*Modification du pH des couches superficielles du sol sous l'influence de l'ammonitrate mis en couverture.*

Nous avons mesuré l'acidification provoquée par l'ammonitrate, appliqué à la surface d'un sol, grâce à des essais en pots maintenus à la température du laboratoire.

Ces pots, en terre, contiennent 2 kg de sol humide et mesurent 14 cm de diamètre. Ils reçoivent, à la pipette, et après la répartition de l'engrais en surface, des arrosages à l'eau permutée correspondant à 5 mm de pluie et, ceci, 5 fois en deux semaines. Au terme de l'expérience, nous avons échantillonné les couches 0-1 cm, 1-4 cm et 4-8 cm en vue d'en déterminer le pH. Voici les résultats pour trois terres différentes qui ont reçu l'équivalent de 100 unités d'azote :

| | Terre 1 | | Terre 2 | | Terre 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Témoin | + $NH_4NO_3$ | Témoin | + $NH_4NO_3$ | Témoin | + $NH_4NO_3$ |
| 0-1 cm | 5,45 | 4,85 | 6,25 | 5,55 | 6,70 | 6,05 |
| 1-4 cm | 5,45 | 5,05 | 6,30 | 5,65 | 6,75 | 6,30 |
| 4-8 cm | 5,25 | 5,15 | 6,25 | 5,90 | 6,55 | 6,45 |

Il y a donc une acidification d'environ 0,5 unité jusqu'à 4 centimètres de profondeur au bout de deux semaines et, deux semaines après une coupe, la repousse est déjà importante, c'est pourquoi nous pensons que cette acidification est au moins partiellement la cause d'un accroissement de l'absorption du cobalt.

Par contre, ce phénomène ne provoque pas d'accroissement du cobalt extrait par l'acide acétique, comme nous l'avons vérifié.

3. *Influence des engrais phosphatés.*

Divers engrais phosphatés ont été appliqués, en couverture, en fin d'hiver, à raison de 75 unités de $P_2O_5$, sur des ray-grass d'Italie déjà implantés :

— Plonéis, 1968 : coupe au stade pâture du 7-5-68 :
témoin (moyenne de 3 parcelles) : 0,033 p.p.m. Co,
scories Thomas (moyenne de 3 parcelles) : 0,027 p.p.m. Co.

— Fouesnant, 1970 : essai effectué au Lycée agricole de Bréhoulou, déjà cité au chapitre précédent :

| | Témoin | Scories Thomas | Superphosphate | Phosphate d'ammoniaque |
|---|---|---|---|---|
| 1re coupe stade pâture, 8-4-70 (moyenne de 8 parcelles) | 0,051 p.p.m. | 0,073 p.p.m. | 0,061 p.p.m. | 0,055 p.p.m. |
| 2e coupe épiaison, 3-6-70 (moyenne de 4 parcelles) | 0,045 — | 0,046 — | 0,046 — | 0,047 — |

Pour le stade pâture, on pourrait penser que les scories ont nettement enrichi le ray-grass en cobalt, mais il n'en n'est rien. D'une part, le calcul statistique indique que ces différences sont non significatives et, d'autre part, 400 kg/ha de scories n'apportent qu'environ 1,2 g de cobalt/ha dont une partie seulement est soluble dans l'acide acétique, et nous verrons au chapitre suivant ce qu'il en est des possibilités d'accroissement des teneurs en cobalt par les sels de cobalt appliqués au sol de différentes manières.

Nous pouvons conclure que les trois engrais phosphatés essayés à Fouesnant n'ont pas diminué la teneur en cobalt des ray-grass alors que, parallèlement, ils accroissent légèrement ou pas du tout les rendements, mais qu'ils accroissent, très nettement, la teneur en phosphore des herbes au stade pâture.

Comhaire (1967) cite trois références bibliographiques concluant au fait que la fertilisation phosphatée est favorable à l'absorption du cobalt. D'autre part, il signale que la fertilisation phosphatée, enrichissant les fourrages en Légumineuses, provoque, de ce fait, un accroissement de la teneur en cobalt.

Reith et Mitchell (1964), expérimentant avec du superphosphate appliqué au printemps (0, 80 et 500 unités de $P_2O_5$ par an), donnent dans leur tableau de résultats (p. 243), des augmentations de teneurs en cobalt des graminées et des mélanges, mais concluent que le superphosphate n'a pas d'effet sur l'absorption du cobalt.

4. *Influence des engrais potassiques.*

Nous n'avons pas spécialement expérimenté sur ce point mais nous pouvons nous reporter au chapitre I à propos de l'« Influence du stade physiologique » puisqu'une parcelle était bien pourvue en $K_2O$ échangeable et avait reçu en plus 150 kg $K_2O$ par hectare du chlorure de potassium alors que l'autre était très pauvre en $K_2O$ échangeable. La figure 1 indique, clairement, que le ray-grass le moins riche en cobalt est celui qui provient de la parcelle pauvre en potasse.

## V. — *Action des sels de cobalt*

C'est le sulfate de cobalt, $CoSO_4$, $7H_2O$ contenant 21 p. 100 de cobalt, qui a été choisi comme sel et appliqué de diverses manières :

1. en pots et mélangé intimement à toute la masse de terre,
2. en plein champ avec incorporation par labour,
3. en plein champ avec incorporation par les façons superficielles précédant le semis,
4. en épandage sur un ray-grass déjà implanté,
5. en pulvérisations foliaires.

1. *Essai en pots.*

Terre granitique humifère ; matière organique = 6 p. 100, argile = 12 p. 100, pH = 5,8. Les vases de végétation sont du type « Riviera » et contiennent 7 kg de terre sèche ; le sulfate de cobalt a été incorporé le 8-3-67, le semis du ray-grass italien de la variété « Rina » a été effectué le 19-4-67. Il y a 6 pots par traitement et les doses prévues apportent, respectivement, 0,5 p.p.m., 1 p.p.m. et 2 p.p.m. Co, soit 16,6 mg, 33,3 mg et 66,6 mg de sulfate de cobalt par pot. Ces quantités correspondent sensiblement à 7,5 kg, 15 kg et 30 kg de sulfate de cobalt par hectare.

Le tableau 7 donne la teneur en cobalt de chacune des coupes effectuées au stade pâture ainsi que la teneur des sols en cobalt acétique après l'expérience :

TABLEAU 7

*Enrichissement en cobalt du ray-grass sous l'action du sulfate de cobalt incorporé à la terre des pots*

| $CoSO_4$, 7 $H_2O$ kg/ha | Témoin 0 | + 0,5 p.p.m. Co 7,5 | + 1 p.p.m. Co 15 | + 2 p.p.m. Co 30 |
|---|---|---|---|---|
| Co soluble dans acide acétique, après expérience. | 0,44 p.p.m. | 0,65 p.p.m. | 0,79 p.p.m. | 1,35 p.p.m. |
| 1re coupe, 4-7-67 ..... | 0,053 p.p.m. | 0,080 p.p.m. | 0,177 p.p.m. | 0,450 p.p.m. |
| 2e coupe, 31-7-67 ..... | 0,045 — | 0,081 — | 0,150 — | 0,395 — |
| 3e coupe, 25-8-67 ..... | 0,053 — | 0,100 — | 0,165 — | 0,445 — |
| 4e coupe, 9-10-67 ..... | 0,056 — | 0,115 — | 0,175 — | 0,380 — |
| 5e coupe, 15-5-68 ..... | 0,040 — | 0,067 — | 0,080 — | 0,165 — |
| 6e coupe, 5-7-68 ..... | 0,075 — | 0,140 — | 0,165 — | 0,320 — |
| Moyenne des 6 coupes | *0,054* — | *0,097* — | *0,152* — | *0,359* — |

On constate, d'une part, que le cobalt apporté au sol sous forme de sulfate de cobalt est extrait par l'acide acétique à 2,5 p. 100 dans des proportions de 35 à 45 p. 100 et, d'autre part, que la teneur des ray-grass est fonction de la teneur en « cobalt acétique » du sol. Cette dernière corrélation est définie par la fonction $y = 0{,}34\,x - 0{,}11$ avec un coefficient de corrélation $r = 0{,}99$ (HS) (calcul effectué sur la teneur moyenne des 6 coupes).

Nous remarquons, enfin, qu'une dose approximative de 7,5 kg/ha de sulfate de cobalt, répartie dans toute la masse du sol, double la teneur en cobalt du ray-grass.

2. *Essai au champ. Incorporation par labour.*

L'essai a été réalisé à Plomelin en 1969 dans le même champ que celui où était implantée l'expérimentation sur l'influence des engrais azotés. Le sulfate de cobalt, épandu sur le sol en solution, le 18-3-69, a été enfoui par un labour le 31-3-69 juste avant le semis du ray-grass italien tétraploïde non alternatif (variété « *Tétrone* »), qui a eu lieu le 1-4-69. Cet épandage était jumelé avec un épandage de sulfate de cuivre comme cela a été décrit dans une Note à l'Académie d'Agriculture (COPPENET, 1970). La dose 1 de sulfate de cobalt est la quantité habituellement conseillée dans divers pays pour la guérison des carences sur ovins et bovins, soit 2 kg/ha. La dose 2 correspond à 4 kg/ha, la dose 3 à 8 kg/ha. Le ray-grass a reçu 50 unités d'azote de l'ammonitrate au semis, puis 50 unités après chaque exploitation ; il a été fauché cinq fois au cours de l'année 1969 à un stade correspondant à un pâturage possible pour les bovins. Les rendements n'ont pas été affectés par les deux oligoéléments enfouis comme cela est logique puisque ce terrain ne présente plus de carence cuprique. Le dispositif comporte 4 traitements avec 4 répétitions et des parcelles élémentaires de 10 m².

Le tableau 8 donne les rendements moyens de chaque exploitation avec les teneurs en cobalt de la matière sèche correspondante (moyenne des 4 parcelles de chaque traitement).

TABLEAU 8

*Enrichissement en cobalt du ray-grass sous l'influence du sulfate de cobalt enfoui par labour*

| | MS produite en t/ha | Témoin | 2 kg/ha | 4 kg/ha | 8 kg/ha |
|---|---|---|---|---|---|
| 1re coupe, 12-6-69 | 2,93 | 0,026 p.p.m.<br>1 | 0,045 p.p.m.<br>1,73 (NS) | 0,061 p.p.m.<br>2,34 (S) | 0,121 p.p.m.<br>4,65 (HS) |
| 2e coupe, 16-7-69 | 3,14 | 0,038 p.p.m.<br>1 | 0,043 p.p.m.<br>1,13 | 0,058 p.p.m.<br>1,52 | 0,111 p.p.m.<br>2,92 |
| 3e coupe, 20-8-69 | 2,19 | 0,084 p.p.m.<br>1 | 0,106 p.p.m.<br>1,26 | 0,087 p.p.m.<br>1,03 | 0,127 p.p.m.<br>1,50 |
| 4e coupe, 6-10-69 | 1,80 | 0,046 p.p.m.<br>1 | 0,048 p.p.m.<br>1,04 (NS) | 0,063 p.p.m.<br>1,37 (NS) | 0,092 p.p.m.<br>2,00 (HS) |
| 5e coupe, 27-11-69 | 1,65 | 0,048 p.p.m.<br>1 | 0,056 p.p.m.<br>1,17 | 0,060 p.p.m.<br>1,25 | 0,082 p.p.m.<br>1,70 |

Pour toutes les doses expérimentées, il y a accroissement des teneurs, la plus forte dose (8 kg/ha) double grosso-modo la teneur initiale. A la première coupe, cette dose de sulfate de cobalt multiplie même la teneur initiale par 4,65. Mathématiquement non significatifs pour 2 kg/ha, ces accroissements le deviennent pour 8 kg/ha (tabl. 8).

Nous constatons, de plus, qu'il existe une assez bonne concordance entre ces résultats et ceux qui ont été obtenus en vases de végétation, comme cela vient d'être dit au paragraphe ci-dessus : la teneur initiale du ray-grass double pour une quantité de sulfate de cobalt d'environ 8 kg/ha.

3. *Incorporation au sol par les façons superficielles précédant le semis.*

L'essai a été réalisé au champ d'expérience de Quimper en 1969, toujours sur la variété de ray-grass italien « Tétrone ». Les mêmes doses de sulfate de cobalt ont été utilisées, mais cette fois sans mélange avec du sulfate de cuivre, le dispositif comportant un carré latin 4 × 4 avec des parcelles élémentaires de 4 m² : répartition des solutions de sulfate de cobalt par pulvérisation sur le sol le 10-3-69, hersage léger le 26-3-69 pour un semis le 2-4-69. Le terrain recevant peu de fumier, les doses d'ammonitrate ont été de 80 unités au semis et de 80 unités après chaque coupe. La sécheresse de l'été, qui a été particulièrement marquée pour ce champ, n'a permis que trois exploitations au stade pâture pour l'année 1969 mais l'expérimentation a été poursuivie en 1970.

Le tableau 9 donne les rendements de chaque exploitation et les teneurs en cobalt de la matière sèche correspondante (moyenne de 4 parcelles par traitement).

TABLEAU 9

*Enrichissement en cobalt du ray-grass sous l'influence du sulfate de cobalt enfoui par les façons superficielles*

| | MS produite en t/ha | Témoin | 2 kg/ha | 4 kg/ha | 8 kg/ha |
|---|---|---|---|---|---|
| 1re coupe, 9-6-69 | 3,38 | 0,062 p.p.m.<br>1 | 0,121 p.p.m.<br>1,95 (NS) | 0,285 p.p.m.<br>4,59 (S) | 0,585 p.p.m.<br>9,43 (HS) |
| 2e coupe, 21-7-69 | 5,50 | 0,072 p.p.m.<br>1 | 0,210 p.p.m.<br>2,91 | 0,365 p.p.m.<br>5,06 | 0,872 p.p.m.<br>12,1 |
| 3e coupe, 15-10-69 | 2,60 | 0,185 p.p.m.<br>1 | 0,392 p.p.m.<br>2,11 (NS) | 0,635 p.p.m.<br>3,43 (HS) | 1,070 p.p.m.<br>5,78 (HS) |
| 4e coupe, 7-4-70 | 2,00 | 0,130 p.p.m.<br>1 | 0,265 p.p.m.<br>2,03 | 0,445 p.p.m.<br>3,42 | 0,882 p.p.m.<br>6,78 |
| 5e coupe, 13-5-70 | 2,90 | 0,137 p.p.m.<br>1 | 0,222 p.p.m.<br>1,62 | 0,547 p.p.m.<br>3,99 | 0,952 p.p m.<br>6,94 |

La 1re dose de 2 kg/ha provoque, dans ces conditions, un accroissement déjà important de la teneur en cobalt, bien que non significatif. A raison de 8 kg/ha, les teneurs sont multipliées par 10 aux deux premières coupes et encore par 6

ou 7 en seconde année (tabl. 9). Le fait d'avoir épandu le sulfate de cobalt en surface, donc dans les tous premiers centimètres, provoque un enrichissement des ray-grass bien plus important que lorsque les mêmes doses sont enfouies par un labour.

4. *Épandage sur un ray-grass déjà implanté.*

Champ d'expérience de Kerbernès en Plomelin (1970). Ce mode d'apport correspond à un épandage à la volée sur une prairie naturelle, par exemple.

Sur un ray-grass italien de deuxième année, nous avons épandu le 26-1-70 du sulfate de cobalt, mélangé à de la terre sèche, toujours aux mêmes doses. Il y a eu trois coupes au stade pâture, les 29 avril, 1er juin et 2 juillet. Le tableau 10 indique la teneur des diverses matières sèches récoltées.

TABLEAU 10

*Enrichissement en cobalt du ray-grass sous l'action du sulfate de cobalt épandu sur un ray-grass déjà implanté*

| | MS produite en t/ha | Témoin | $CoSO_4$, $7H_2O$ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2 kg/ha | 4 kg/ha | 8 kg/ha |
| 1re coupe, 29-4-70 | 2,64 | 0,066 p.p.m.<br>1 | 0,73 p.p.m.<br>11,0 | 1,41 p.p.m.<br>21,3 | 2,28 p.p.m.<br>34,5 |
| 2e coupe, 1-6-70 | 2,52 | 0,080 p.p.m.<br>1 | 0,68 p.p.m.<br>8,5 | 1,21 p.p.m.<br>15,1 | 1,94 p.p.m.<br>24,2 |
| 3e coupe, 2-7-70 | 1,50 | 0,054 p.p.m.<br>1 | 0,35 p.p.m.<br>6,48 | 0,70 p.p.m.<br>12,9 | 1,57 p.p m<br>29,1 |

Les accroissements de teneur sont énormes pour les doses 4 et 8 kg/ha. La teneur initiale est décuplée pour la plus faible dose (2 kg/ha) et multipliée par 30 pour la plus forte (8 kg/ha) (tabl. 10).

Puisque nous venons de voir au paragraphe précédent que 8 kg/ha de sulfate de cobalt apportés en couverture sur le sol, avant semis, provoquent un enrichissement de 6 à 10 fois, nous pouvons en conclure que, dans le cas présent, la souche de la graminée s'enrichit fortement et permet le développement successif de feuilles elles-mêmes très riches. La seule absorption par les racines ne peut expliquer ce phénomène.

Dans la bibliographie étrangère, il est surtout fait état d'apports de sels de cobalt en « top-dressing » sur des prairies déjà implantées, donc dans les conditions de cette dernière expérience. Stewart, Mitchell et Stewart (1941) ont expérimenté, en Écosse, sur un mélange de ray-grass, fétuque, dactyle et trèfle, les doses de 0,5, 1, 2, 10, 40 et 80 livres par acre de $CoCl_2$, 6 $H_2O$. La teneur en cobalt du fourrage est passée de 0,11 p.p.m. dans le témoin à 0,51 et 0,83 p.p.m. pour les parcelles ayant reçu 2 livres de chlorure de cobalt par acre.

Reith et Mitchell (1964) donnent les teneurs de ray-grass après apports de 2, 4 et 16 livres par acre de $CoSO_4$, 7 $H_2O$. Pour un sol acide de pH = 5,6, les

accroissements de teneurs sont, pour la dose de 2 livres, de 6 à 8 fois en première année, de 4 à 6 fois en seconde année, de l'ordre de 2 fois en troisième année. Ces accroissements sont donc comparables aux nôtres ; les auteurs concluent que la dose de 2 livres par acre est suffisante pour produire des herbes suffisamment pourvues en cobalt, pendant au moins trois ans, lorsqu'on l'applique à un sol déficient légèrement acide. En sol chaulé et en sol calcaire, les enrichissements correspondants sont nettement moins élevés.

5. *En pulvérisations foliaires.*

Nous avons pulvérisé des solutions de sulfate de cobalt très diluées (0,01 p. 1 000), à raison de 1 100 litres par hectare. Ceci correspond à 11 g/ha de sulfate et à 2,3 g/ha de cobalt, soit de 13 à 17 fois la quantité de cobalt contenue dans l'herbe de la coupe à venir.

De manière à observer l'incidence de la surface foliaire au moment de la pulvérisation, les dates des traitements sont choisies ainsi : 1. le jour même de la fauche et immédiatement après celle-ci ; 2. lorsque les repousses des graminées ont 6 à 8 centimètres de longueur ; 3. lorsque ces repousses ont 12 à 15 centimètres de longueur. Ces stades correspondent sensiblement, en période estivale, à 8 jours et à 15 jours après la fauche. Les parcelles élémentaires, d'une surface de 4,5 m² et entourées d'allées sont disposées en carré latin avec 4 traitements et 4 répétitions. Le tableau II indique les teneurs obtenues en 1968 pour un ray-grass anglais (variété « Melle pâture ») et, en 1969, pour un ray-grass italien (variété « Tétrone »), l'un et l'autre étant en seconde année.

TABLEAU II

*Enrichissement en cobalt du ray-grass sous l'action de pulvérisations foliaires de sulfate de cobalt à 0,01 p. 1 000*

| | | Témoin | Jour de la coupe | Repousses 7 cm | Repousses 15 cm |
|---|---|---|---|---|---|
| Ray-grass anglais 1968 | 1re coupe, 20-5-68 | 0,073 p.p.m.<br>1 | 0,080 p.p.m.<br>1,09 | 0,093 p.p.m.<br>1,27 | 0,120 p.p.m.<br>1,64 |
| | 2e coupe, 1-7-68 | 0,100 p.p.m.<br>1 | 0,110 p.p.m.<br>1,10 (NS) | 0,135 p.p.m.<br>1,35 (HS) | 0,170 p.p.m.<br>1,70 (HS) |
| Ray-grass italien 1969 | 1re coupe 8-5-69 | 0,057 p.p.m.<br>1 | 0,069 p.p.m.<br>1,21 | 0,100 p.p.m.<br>1,75 | 0,162 p.p.m.<br>2,84 |
| | 2e coupe, 5-6-69 | 0,079 p.p.m.<br>1 | 0,109 p.p.m.<br>1,39 (S) | 0,160 p.p.m.<br>2,02 (HS) | 0,185 p.p.m.<br>2,34 (HS) |
| | 3e coupe, 8-7-69 | 0,056 p.p.m.<br>1 | 0,066 p.p.m.<br>1,18 | 0,080 p.p.m.<br>1,43 | 0,154 p.p.m.<br>2,75 |

Le ray-grass anglais, récolté le 20-5-68, a reçu la pulvérisation le 22-3-68 pour le « jour de la coupe », le 29-3-68 pour les « repousses 7 cm » et le 5-4-68 pour les « repousses 15 cm ». Le ray-grass anglais, récolté le 1-7-68, a reçu la pulvérisation le 20-5-68 pour le « jour de la coupe », le 29-5-68 pour les « repousses 7 cm » et

le 5-6-68 pour les « repousses 15 cm ». L'expérience sur ray-grass italien de 1969 confirme aussi qu'à partir d'une longueur de repousse de 7 cm, les pulvérisations enrichissent, très significativement, les ray-grass. Les accroissements de teneur sont de 2 à 3 fois pour les « repousses de 15 cm », ce qui montre bien l'importance de la surface foliaire au moment de la pulvérisation.

*Le cobalt dosé après pulvérisation foliaire est-il bien du cobalt entrant dans la constitution de la matière sèche ou, au contraire, du cobalt provenant simplement des dépôts sur les surfaces foliaires ?*

Nous ferons d'abord remarquer que la quantité pulvérisée (13 à 17 fois l'exportation de la coupe à venir), dont une petite partie retombe directement sur le sol, est loin de se retrouver dans la récolte puisque les teneurs y sont seulement doublées ou triplées.

Les chutes de pluie ont, semble-t-il, toujours été suffisamment abondantes pour entraîner l'excès des éléments déposés à la surface des parties aériennes. Entre la date de pulvérisation sur les « repousses 15 cm » et la date de la fauche suivante, il est tombé, respectivement, 122 mm et 63 mm d'eau en 1968, 69 mm, 51 mm et 28 mm d'eau en 1969. La hauteur des précipitations a été ainsi très variable, alors que les indices d'accroissement des teneurs en cobalt sont relativement constants.

Il y a lieu de remarquer aussi, que l'accroissement des teneurs est proportionnel à la longueur des repousses au moment de la pulvérisation, donc aux surfaces foliaires capables d'absorber le sulfate de cobalt.

La pulvérisation n'apportant que 0,57 p. 100 de la plus petite dose de sulfate de cobalt (2 kg/ha) expérimentée au chapitre 3 précédent (incorporation par les façons superficielles), il n'est pas possible que les retombées au sol viennent fausser, d'une manière sensible, les résultats des coupes ultérieures.

Nous avons, enfin, effectué des trempages, dans l'eau, d'herbes traitées ou non traitées. Les échantillons, placés dans un récipient d'eau froide, ont été abandonnés d'une part, 5 minutes et, d'autre part 4 heures avec trois changements d'eau pendant ce dernier laps de temps. Ensuite, il a été procédé à la dessiccation et au broyage habituel en vue de l'analyse minérale. Voici les résultats des dosages, chaque chiffre étant la moyenne de 3 échantillons :

| | Pas de trempage | Trempage dans l'eau | |
|---|---|---|---|
| | | 5 minutes | 4 heures |
| 1re *expérience :* ray-grass n'ayant pas reçu de pulvérisation de $CoSO_4$ ..... | 0,159 p.p.m. | 0,125 p.p.m. | 0,101 p.p.m. |
| 2e *expérience :* ray-grass n'ayant pas reçu de pulvérisation de $CoSO_4$ ..... | 0,043 — | 0,040 — | 0,034 — |
| 3e *expérience :* ray-grass ayant reçu une pulvérisation de $CoSO_4$ ... | 0,154 — | 0,141 — | 0,101 — |
| 4e *expérience :* ray-grass ayant reçu une pulvérisation de $CoSO_4$ ... | 0,176 — | 0,106 — | 0,125 — |

Le trempage des échantillons d'herbe dans l'eau froide occasionne donc, que cette herbe ait reçu ou non une pulvérisation de $CoSO_4$, une diminution du taux de cobalt comprise entre 20 et 35 p. 100.

Dans le cas d'un dépôt de $CoSO_4$ sur les feuilles, la diminution de teneur devrait être plus importante dans le cas des herbes traitées.

Tous les éléments que nous venons de considérer ci-dessus paraissent prouver que le cobalt, dosé après pulvérisation des herbes aux sels de cobalt, a bien été absorbé par la feuille.

Au cours de ces mêmes quatre expériences, nous avons trouvé une diminution de la teneur en cuivre lorsque cet élément est pulvérisé, en même temps que le cobalt, sous forme de solutions de sulfate de cuivre à 0,5 p. 1 000, mais pas de diminution de la teneur lorsqu'il n'y a pas eu de pulvérisation. Au bout de 4 heures de trempage, nous avons noté aussi, dans trois expériences sur quatre, une chute d'environ 10 p. 100 de la teneur en potassium, une petite chute des teneurs en calcium et en manganèse alors que le taux de phosphore reste invariable.

## DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Les teneurs des ray-grass n'ayant pas reçu d'apports volontaires de sels de cobalt sont comprises entre 0,02 et 0,15 p.p.m. Co par rapport à la matière sèche. Les ray-grass d'Italie récoltés en Bretagne et sur lesquels a porté l'essentiel de la présente étude, proviennent, soit de sols pauvres en cobalt formés sur roches granitiques, soit de sols bien pourvus en cobalt, formés sur schistes primaires. La richesse des sols en cobalt, l'époque de l'année et le stade physiologique de la plante sont les facteurs prépondérants de la valeur du taux de cobalt dans la matière sèche du ray-grass.

Le tableau synoptique de la figure 5, auquel on se reportera, résume les résultats des différents chapitres de notre étude.

Nous n'avons pas suffisamment de résultats analytiques pour comparer les teneurs des ray-grass italiens à celles d'autres espèces de graminées fourragères. Le trèfle blanc, cultivé en mélange avec le ray-grass anglais, nous a révélé, soit des teneurs comparables à celles de la graminée, soit des teneurs nettement plus élevées pour certaines coupes de la période estivale. Les choux fourragers analysés accusent des teneurs voisines de 0,05 p.p.m. Co, tandis que celles du maïs, plante entière, au stade de la maturité du grain, sont comprises entre 0,01 et 0,07 p.p.m. Co pour une moyenne de 0,032 p.p.m. Co (150 échantillons).

La corrélation entre la teneur en cobalt des ray-grass et la teneur du sol correspondant est assez facile à mettre en évidence, si l'on compare des sols de teneurs éloignées les unes des autres, mais à l'intérieur d'un même grand type d'origine géologique, cette corrélation n'est plus significative. Ceci est valable, à la fois pour le cobalt total des sols et pour le cobalt extrait par l'acide acétique à pH = 2,5.

Grâce à nos expériences, qui ont porté sur des cultures de graminées pures, nous avons suivi des chutes de teneurs, depuis le stade feuillu-jeune jusqu'au stade graines mûres, pouvant aller de 25 à 50 p. 100. Nous avons aussi mis en évidence

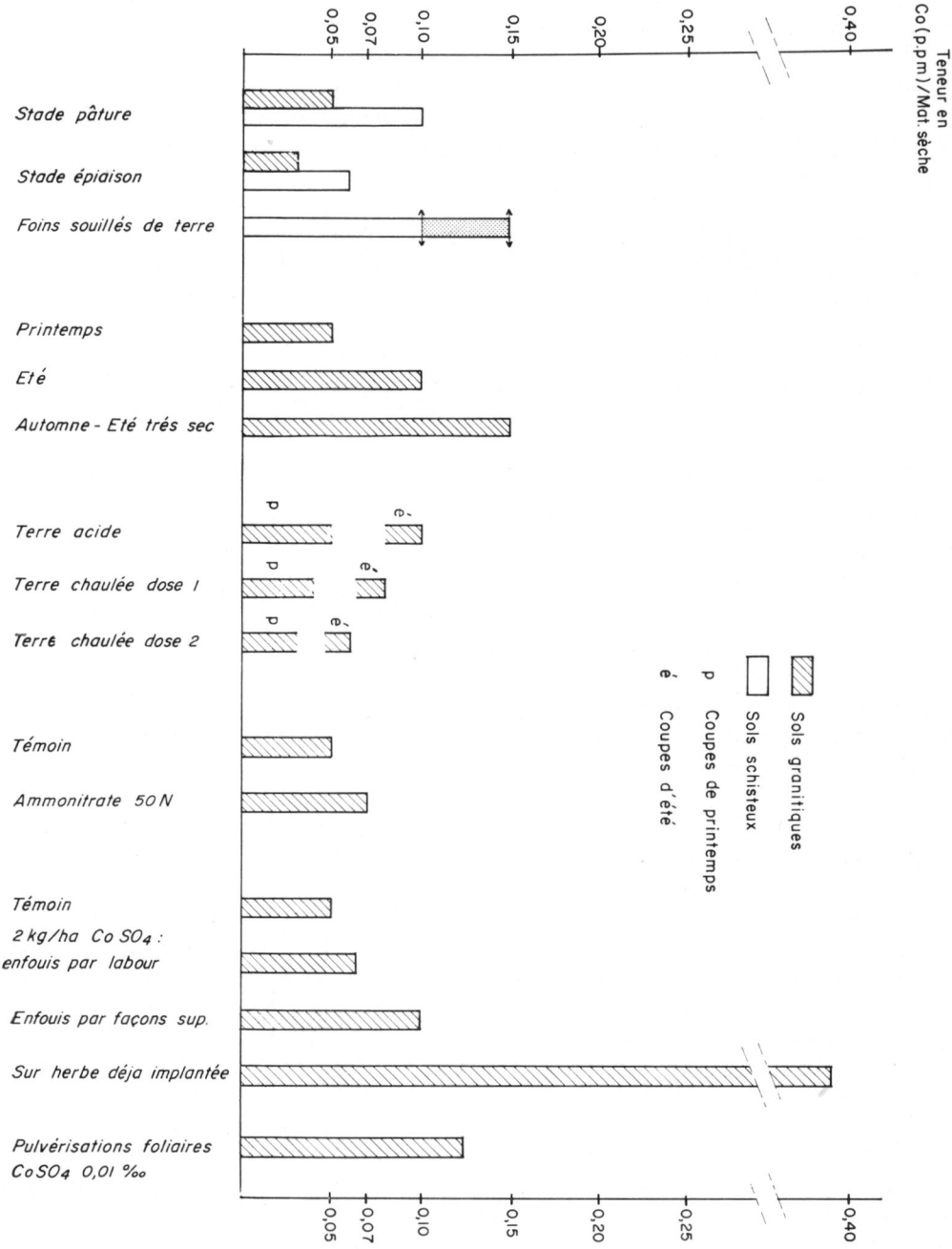



FIG. 5. — *Résumé schématique des variations des teneurs en cobalt du ray-grass d'Italie*

un accroissement des teneurs avec l'avancement de la saison puisque celles-ci peuvent doubler, et plus, aux exploitations d'automne.

Par des essais en pots, nous avons mesuré une diminution du cobalt dans la plante d'au moins 20 p. 100 pour un relèvement du pH de 0,7 à 0,8 unité et comparé ces résultats à ceux de travaux étrangers.

L'ammonitrate acidifiant les horizons superficiels du sol, nous observons un net accroissement des teneurs en cobalt des ray-grass recevant cet engrais, tout au moins lorsque le délai entre l'apport et la coupe suivante est assez court (5 à 6 semaines), comme cela se produit en période favorable à la croissance.

Dans la pratique, pour les régions considérées ici, il est bien certain qu'un pH des sols voisin de 6 doit être réalisé pour obtenir de bons rendements et que, d'autre part, il sera également nécessaire de fertiliser à l'optimum économique en éléments azotés, phosphatés et potassiques. Dans ces conditions, les ray-grass au stade feuillu (stade propice au pâturage) contiendront, en moyenne, 0,110 p.p.m. Co sur schistes, et 0,045 p.p.m. Co sur granites, mais seuls les premiers sont capables de couvrir les besoins des ruminants, estimés à 0,07 p.p.m. environ.

Au stade épiaison, la matière sèche est moins riche et contient, en moyenne, 0,075 p.p.m. Co sur schistes et 0,032 p.p.m. Co sur granites. Dans le premier cas, 6 p. 100 des échantillons ont une teneur voisine de 0,02 p.p.m. et 50 p. 100 des échantillons une teneur égale ou supérieure au seuil de 0,07 p.p.m. ; dans le second cas, au contraire, 40 p. 100 des échantillons révèlent une teneur voisine de 0,02 p.p.m. Co et 5 p. 100 seulement une teneur égale ou supérieure à 0,07 p.p.m.

L'étude de l'enrichissement en cobalt du ray-grass par le sulfate de cobalt a été poursuivie de plusieurs manières : 1. en pots, par mélange à toute la masse de terre ; 2. en plein champ, avec incorporation, par labour, avant le semis ; 3. en plein champ, avec incorporation par les façons superficielles précédant le semis ; 4. en épandage, à sec, sur un ray-grass déjà implanté ; 5. en pulvérisations foliaires très diluées (0,01 p. 1 000).

Pour la dose 2 kg/ha, l'enfouissement par labour multiplie la teneur initiale par 1,2, l'incorporation par les façons superficielles par 2, tandis que l'apport sur le ray-grass déjà implanté multiplie la teneur initiale par 8. C'est cette dernière technique qui a été la plus utilisée et qui est, en effet, la plus intéressante. Ces conclusions nous paraissent valables également pour les autres graminées, les trèfles blancs et les prairies naturelles.

Si l'on n'adopte pas la solution « enrichissement du ray-grass au cours de sa croissance », il faudra envisager la solution « incorporation directe aux aliments donnés à l'auge d'un complément minéral contenant du cobalt ». Un complément minéral, contenant 10 p.p.m. de cobalt et donné à une vache laitière à raison de 120 grammes par jour, remonte la teneur d'une ration de 12 kg de matière sèche de 0,1 p.p.m. Co, c'est-à-dire d'une quantité suffisante, quelle que soit la teneur de la ration de base.

En Bretagne, il est nécessaire de surveiller attentivement les régions granitiques qui fournissent, au début de l'année, et même au stade pâture, des ray-grass insuffisamment pourvus en cobalt. Les foins seront encore beaucoup moins riches puisque, même en régions schisteuses, la moitié des foins est carencée.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*

## SUMMARY

### VARIATIONS OF RYE- GRASS COBALT CONTENT
### INVESTIGATING ENRICHING METHODS

The work described herein was chiefly carried out with Italian rye-grass (*Lolium italicum*) grown in Brittany on slightly acidic soils high in organic matter and formed either on granitic rock practically devoid of cobalt or primary shale high in the latter.

The effect of the cobalt content of the soil with respect to that of the rye-grass is considerable as are the time of year and the stage of growth of the plant.

Figure 5 summarizes this paper.

The rye-grass contents unsupplied with cobalt salts range from 0.02 to 0.15 p.p.m. of Co with respect to dry matter.

Rye-grass in the shooting-into-ear stage being less rich than at grazing time, only the pasture lands cultivated on soils with a high cobalt content (0.84 p.p.m. of acetic cobalt) provide dry matter with a cobalt content (0.110 p.p.m.) sufficient for ruminants' requirements which are evaluated at 0.07 p.p.m.

The pasture lands with the lower cobalt contents are those in granitic areas where the acetic-cobalt content of such lands, is no greater than 0.24 p.p.m., this datum rising no higher than 0.045 p.p.m. early in the year.

The pH of the soils, rising owing to liming materials causes the cobalt content of the plant to drop whereas fertilizing of rye-grass pastures with ammonium nitrate increases such content, this arising through the surface acidification so brought about.

Investigating cobalt enrichment of rye-grass by means of cobalt sulphate was carried out in five different ways, as follows :

1° in tests pots, by mixing thoroughly with the earth therein ;
2° in open fields, by addition when ploughing, prior to sowing ;
3° in open fields, by addition when tilling the soil, prior to sowing ;
4° dry top dressing of already planted ray-grass ;
5° highly diluted (0.01 p. 1 000) leaf sprayings.

Method 4 (above) provides the higher enrichment factors ($\times$ 8 or $\times$ 10), even with but 2 kg of cobalt sulphate per hectare.



## ZUSAMMENFASSUNG

### VERÄNDERUNGEN DES KOBALTGEHALTES DES RAYGRASES
### UNTERSUCHUNG VON ANREICHERUNGSVERFAHREN

Die Verfasser arbeiteten im wesentlichen mit italienischem Ray-grass (*Lolium italicum*), das in der Bretagne auf Böden mit leicht sauerer Reaktion, reich an organischen Stoffen geerntet wurde. Diese Böden waren entweder auf kobaltarmem granitischen Gestein, oder auf reichlich mit Kobalt versorgten primären Schiefer gebildet.

Der Einfluss der Reichhaltigkeit des Bodens an Kobalt auf den Kobaltgehalt des Raygrases ist sehr wichtig. Dasselbe gilt für den Zeitabschnitt des Jahres und für das Entwicklungsstadium der Pflanze. Abbildung 5 gibt eine umfassende Darstellung des vorliegenden Artikels. Der Gehalt an Kobalt von Raygräsern, welchen keine Zufuhr an Kobaltsalzen erhalten, wechselt zwischen 0,02 und 0,15 p.p.m. Kobalt im Verhältnis zur Trockensubstanz.

Angesichts der Tatsache, dass Ray gras im Stadium des Aehrentriebs weniger reich ist als im Stadium der Weide, liefern nur die auf Schieferböden angebauten und gut mit Kobalt versorgten (0,84 p.p.m. essigsaueres Kobalt) Raygrasweiden eine Trockensubstanz, deren Kobaltgehalt (0,110 p.p.m.) ausreichend ist, die Bedürfnisse der Wiederkäuer zu decken, die zu 0,07 p.p.m. geschättzt werden,

Die Weiden mit besonders geringen Kobaltgehalt befinden sich in den granitischen Gebieten (essigsauerer Kobalt der Böden = 0,24 p.p.m.), und zwar am Anfang des Jahres, wo ihr Kobaltgehalt im Mittel 0,045 p.p.m. beträgt.

Der Einfluss der kalkhaltigen Dünger verursacht eine Steigerung des pH-Wertes der Böden, die eine deutliche Verringerung des in der Pflanze enthaltenen Kobalts hervorruft. Dagegen

verursachen im Allgemeinen die Zufuhren von Ammoniumnitrat auf reiner Raygras-Weide eine Steigerung des Gehaltes, die sich durch die oberflachliche Ansäuerung erklären lässt.

Die Kobalt-Anreichrungsversuche des Raygrasses durch das Kobaltsulfat wurden nach verschiedenen Verfahren durchgeführt :

1° in Töpfen, durch Mischung mit der gesamten Erdmasse ;
2° auf offenem Felde durch einarbeiten mit dem Pflug vor der Aussaat ;
3° auf offenem Felde mit Einarbeitung in oberflächlicher Weise vor der Aussaat ;
4° durch Ausstreuen auf schon gebildetes Raygras ;
5° durch sehr verdünnte Bespritzung des Grases (0,01 p. 10 000).

Der stärkste Anreicherungskoeffizient (× 8, odder × 10) wird durch Ausstreuen auf schon gebildetes Raygras erhalten, selbst wenn die Dosis 2 kg Kobaltsulfat pro h beträgt.

## РЕЗЮМЕ

**Изменения содержания кобальта в рай-грассах. Изучение технических приемов обогащения.**

М. КОППЕНЕ, Е. МОРЭ, Л. ЛЕ КОРР, М. ЛЕ МАО.

Работа велась главным образом с итальянским рай-грассом (*Lolium italicum*), собранным в Бретани, на почвах со слегка кислой реакцией, богатых органическим веществом и сформировавшихся на гранитических породах бедных кобальтом, или на первичных сланцах, содержащих крупные количества этого элемента.

Влияние содержания кобальта в почве на его содержание в растениях рай-грасса очень велико, также как и влияние времени года и физиологической стадии в которой находились собранные растения. Рисунок № 5 резюмирует данную работу. Содержание кобальта в растениях рай-грасса, не получавших кобальтовой подкормки, представляет от 0,02 до 0,15 мг/кг сухого вещества.

Рай-грасс собранный в стадии колошения менее богат кобальтом чем то-же растение в пастбищной стадии, и только пастбища рай-грасса на сланцевых почвах богатых кобальтом (0,84 мг/кг уксуснокислого кобальта) доставляют сухое вещество содержащее количества кобальта достаточные (0,110 мг/кг сухого вещества) чтобы полностью покрыть нужды (0,07 мг/кг сухого вещества) жвачных в этом элементе. Пастбища наименее богатые кобальтом раположены в гранитических районах (уксуснокислый кобальт почвы = 0,24 мг/кг), и в начале года содержат не больше чем 0,045 мг/кг почвы.

Увеличение pH почв, с помощью известкования, вызывает уменьшение содержания кобальта в растениях, и напротив, внесение в луговые почвы с рай-грассом аммиачной селитры вызывает почти всегда увеличение содержания кобальта, об'ясняющееся поверхностным увеличением кислотности.

Изучение обогащения рай-грасса кобальтом, при помощи сернокислого кобальта, проводилось различными способами : 1) в вегетационных сосудах сернокислый кобальт смешивался с общим количеством почвы; 2) в полевых опытах это микроудобрение вносилось в почву при вспашке перед посевом; 3) в других полевых опытах сернокислый кобальт вносился при поверхностной обработке предшествовавшей посеву; 4) микроудобрение разбрасывалось в сухом виде на уже посеянный рай-грасс; 5) опрыскивание выросших растений очень слабым раствором сернокислого кобальта (0,01 ‰)

Разбрасывание сернокислого кобальта в сухом виде на выросшие уже растения дало наибольший коэффициент обогащения (х 8, или х 10), даже при применении дозы в 2 кг сернокислого кобальта на гектар.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ASKEW H. O., MAUNSELL P. W., 1937. *N. Z. Journ. Sci. Tech.*, **19**, 337-342 (cité par MC NAUGHT K. J., PAUL G. W., 1939).

CHAPMAN H. D., 1966. *Diagnostic criteria for plants and soils.* University of California, Division of Agricultural Sciences, Riverside Ed. 793 p.

COMHAIRE M., 1967. Cobalt for living beings ; first part : cobalt for animals. *Agri. Digest*, **11**, 12-31.

COPPENET M., CALVEZ J., 1962. Variations de la composition minérale de dix variétés de graminées fourragères au cours d'une année d'exploitation au rythme pâture. *Ann. agron.*, **13**, 203-219.

COPPENET M., 1964. Sur les variations de la composition minérale des graminées fourragères exploitées en régime de pâturage. *C. R. Acad. Agric.*, 330-344.

COPPENET M., CALVEZ J., 1967. Les oligoéléments et, en particulier, le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. *C. R. Acad. Agric.*, 939-947.

COPPENET M., 1970. Les oligo-éléments en France ; exemples de problèmes régionaux : le Massif Armoricain. *Ann. agron.*, **21**, 587-601.

CORNER H. H., SMITH A. M., 1938. *Biochem. J.*, **32**, 1800-1805 (cité par MC NAUGHT K. J., PAUL G. W., 1939).

DATTA N. P., DATTA BISWAS N. R., 1951. Trace elements in some Indian grasses, forage crops, concentrates and mineral supplements. *Indian J. Agr. Sci.*, **21**, 93-96.

FLEMING G. A., MURPHY W. E., 1968. The uptake of some major and trace elements by grasses as affected by season and stage of maturity. *S. Britt. Grassl. Soc.*, **23**, 174-185.

FLEMING G. A., 1970. The influence of stage of maturity and season on trace element levels in perennial rye-grass. *Agri. Digest.*, **19**, 25-32.

HEALY W. B., 1968. Ingestion of soil by dairy cows. *New Zeal. J. Agric. Res.*, **11**, 487-499.

HEALY W. B., MC CABE W. J., WILSON G. F., 1970. Ingested soil as a source of microelements for grazing animals. *New Zeal. J. Agric. Res.*, **13**, 503-521.

HILL A. C., TOTH S. J., BEAR F. E., 1953. Cobalt status of New Jersey soils and forage plants and factors affecting the cobalt content of plants. *Soil Sci.*, **76**, 273-284.

KUBOTA J., 1964. Cobalt content of New England soils in relation to cobalt levels in forages for ruminant animals. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **28**, 246-251.

MAROCKE R., 1958. Carence présumée en cobalt des fourrages produits en haute montagne vosgienne. *Chim. et ind.*, **79**, 782-784.

MESSAGER J. L., 1970. *Alimentation et fertilité des vaches laitières.* Plaquette 100 p. Maison de l'élevage du Finistère, 29-S, Quimper.

MITCHELL R. L., 1957. *The trace element content of plants.* Research Lond., **10**, 357-362.

MITCHELL R. L., REITH J. W. S., JOHNSTON I. M., 1957. Trace element uptake in relation to soil content. *J. Sci. Food Agric.*, Suppl. Issue, **8**, 51-59.

MC NAUGHT K. J., PAUL G. W., 1939. Seasonal variation in cobalt content of North Island pastures. *New Zeal. J. Sci. Tech.*, **21** B, 95-101.

MORÉ E., 1969. Sur le microdosage colorimétrique du cobalt dans les végétaux : interférence du fer, contaminations par la terre. *Ann. agron.*, **20**, 527-538.

RANA S. K., OUELETTE G. J., 1968. Correlation between plant uptake and different methods of extraction of soil cobalt. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, **16**, 89-91.

REDDY K. G., MEHTA B. V., 1961. Investigation on the determination of available cobalt in soils of Kaira District in Gujarat. *Indian J. Agric. Sci.*, **31**, 261-265.

REITH J. W. S., INKSON R. H. E., 1964. The effects of fertilizers on herbage production. *J. Agric. Sci.*, **63**, 209-219.

REITH J. W. S., MITCHELL R. L., 1964. The effect of soil treatment on trace element uptake by plants. *Pl. Anal. Fert. Pr.*, **4**, 241-254.

RIGG T., ASKEW H. O., 1934. Soil and mineral supplements in the treatment of bush-sickness. *Empire J. Exp. Agric.*, **2**, 1-8.

STANTON D. J., KIDSON E. B., 1939. Cobalt status of soils and pastures in the Sherry and Wangapeka districts, Nelson. *New Zeal. J, Sci. Tech.*, **21** B, 65-76.

STEWART J., MITCHELL R. L., STEWART A. B., 1941. Pining in sheep : its control by administration of cobalt and by use of cobalt-rich fertilizers. *Emp. J. Exp. Agric.*, **9**, 145-152.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (2), 197-239.

# EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX (*)

## I. — Comportement des éléments grossiers poreux vis-a-vis de l'eau

R. GRAS

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

---

## RÉSUMÉ

Des matériaux poreux naturels et artificiels sont caractérisés par leurs porosités totale et ouverte et la géométrie de leur espace poral.

Le degré de remplissage par l'eau de leur porosité ouverte est étudié dans plusieurs conditions : humectation rapide, avec précaution, à la pression atmosphérique, sous vide.

A la suite de l'humectation avec précaution, une partie de la porosité ouverte reste occupée par l'air ; la fraction de porosité ouverte pleine d'air est caractéristique de chaque matériau.

L'étude théorique et expérimentale des mécanismes d'emprisonnement d'air montre que celui-ci est d'autant plus intense que l'irrégularité de l'espace poral est plus accentuée.

Comme le rayon maximum des pores constitue un indice de cette irrégularité, on comprend la raison de la régression existant entre le rayon maximal des pores et le volume d'air emprisonné en pour cent de la porosité ouverte.

---

## INTRODUCTION

Les constituants élémentaires du sol sont classés suivant leurs dimensions en terre fine et en fraction grossière. Cette dernière est constituée par les éléments qui ne passent pas à travers un tamis de 2 mm à trous ronds.

(*) Ce travail fait partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Les éléments grossiers du sol passaient habituellement pour un lest inerte qui diluait la quantité de terre fine présente dans l'unité de volume d'un sol en place ; on pensait donc que la présence de cailloux dans le sol devait toujours réduire la croissance des plantes qu'il portait.

Une étude de l'écologie des pêchers dans la Vallée du Rhône a montré que dans cette région l'effet négatif attendu ne se manifestait pas. Le déficit annuel moyen des précipitations sur l'évapotranspiration y est de 250 mm ; la capacité de réserve de la couche de sol exploitée étant dans les meilleurs cas de 130 mm seulement, toute réduction de cette valeur aurait dû se traduire par une diminution de croissance des arbres. Or, on n'a rien constaté de tel lorsqu'on a comparé les arbres poussant sur des sols sableux sans cailloux et ceux qui poussent sur des sols ne différant des précédents que par la présence de 60 p. 100 de cailloux (en masse), ce qui aurait dû se traduire par une réduction de moitié environ de la capacité de réserve en eau du sol.

Il fallait donc admettre que les éléments grossiers intervenaient dans l'alimentation en eau des arbres. On pouvait penser que la présence de cailloux à la surface du sol diminuait le ruissellement et augmentait d'autant la quantité d'eau infiltrée, ou que ces cailloux réduisaient l'évaporation, en se comportant comme une couverture du sol. Ces effets ne paraissaient pas susceptibles d'expliquer seuls l'importance du résultat constaté. Il fallait faire l'hypothèse que les cailloux contribuaient directement à la fourniture d'eau, hypothèse rendue plausible par le fait qu'ils étaient poreux.

Des constatations analogues, faites sur des cailloutis des terrasses du Rhône, des fragments de granite et de schistes altérés, des calcaires des Charentes et la craie du Bassin de Paris, m'ont incité à étudier expérimentalement l'influence des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau du sol.

Un sol contenant des éléments grossiers est un système hétérogène constitué de deux matériaux de propriétés différentes: la terre fine et les éléments grossiers. Les propriétés hydriques d'un tel système découlent d'une part de celles des deux matériaux, d'autre part des échanges d'eau et des équilibres hydriques qui s'établissent entre eux. Il importe donc de connaître d'abord les propriétés hydriques des matériaux grossiers poreux.

Dans cette partie on étudie donc les éléments grossiers poreux rigides, afin de dégager les propriétés qui éclaireront leur comportement dans le système hétérogène terre fine-élément grossier. Comme il s'agit d'élucider les mécanismes de façon à formuler des conclusions de portée générale, on a choisi des matériaux poreux présentant des propriétés fort différentes.

## I. — LA POROSITÉ, VALEUR DE RÉFÉRENCE POUR JUGER DE LA TENEUR EN EAU D'UN CORPS POREUX

On peut penser que le volume maximal d'eau que renferme un matériau comportant des vides est identique au volume de ses vides. Ceci revient à admettre que le remplissage des vides par l'eau est total, ce qui n'est pas toujours le cas, comme l'a montré HAINES sur un massif de billes de verre (KEEN, 1931).

Les procédés utilisés par divers auteurs pour « remplir » la porosité sont très différents : immersion dans l'eau froide ou bouillante, pendant des durées variées, à la pression atmosphérique ou sous vide, etc. Il nous est apparu que les grandes différences entre ces méthodes reflètent le doute de leurs auteurs quant à la possibilité de saturer effectivement le corps poreux. Ces auteurs indiquent rarement d'ailleurs si la saturation est effectivement réalisée.

Comme nous avions besoin d'une valeur de référence pour juger du degré de remplissage de nos milieux poreux par l'eau, nous avons cherché une caractéristique moins sujette à caution que l'humidité d'un corps poreux dit « saturé ».

Ceci nous a amené à considérer le volume des vides existant dans le matériau.

## I. I. — *Considérations d'ordre général sur la porosité*

### I. II. *La porosité totale.*

C'est le volume des espaces lacunaires contenus dans un volume apparent donné de matériau. Le *volume apparent* est pour un échantillon la somme du volume de solide (*volume réel*) et du volume des espaces lacunaires. Par exemple, si on taille dans de la craie une éprouvette parallélépipédique, le volume apparent sera le volume de ce parallélépipède. En fait, la notion de volume apparent est assez contingente. Dans le cas d'un morceau de meulière grossière, par exemple, le solide comporte à sa surface des trous qu'on peut inclure dans le volume apparent ou exclure de celui-ci. La porosité totale, rapport du volume des pores au volume apparent du matériau, s'exprime en p. 100 du volume apparent.

Comme :

$$\text{Volume apparent} = \text{volume des pores} + \text{volume réel} \tag{1}$$

on a

$$\text{Porosité totale} = \frac{\text{Volume apparent} - \text{Volume réel}}{\text{Volume apparent}} \tag{2}$$

Théoriquement, les mesures sur un échantillon des volumes apparent et réel permettent d'accéder à la porosité. Comme ceci n'est pas toujours facile à réaliser, on cherche à calculer la porosité à partir des masses volumiques réelle et apparente du matériau ; sous réserve que le matériau soit homogène, on peut utiliser des fragments différents pour ces deux déterminations.

Une masse $m$ de matériau a un volume réel $v_r$, une masse volumique réelle $d_r$ : $d_r = \frac{m}{v_r}$ (3)

un volume apparent $v_a$, une masse volumique apparente $d_a$ : $d_a = \frac{m}{v_a}$ (4)

L'équation (2) s'écrit alors en désignant par P la porosité totale

$$P = \frac{m/d_a - m/d_r}{m/d_a} = 1 - \frac{d_a}{d_r}$$

$$P \text{ (p. 100 volume apparent)} = 100 \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) \tag{5}$$

Les masses volumiques se calculent respectivement à partir des formules (3) et (4).

Le volume réel se mesure soit au pycnomètre à liquide, soit au pycnomètre à air (cf. Annexe 1) sur un échantillon broyé avec suffisamment de finesse, c'est-à-dire lorsqu'un broyage supplémentaire réduisant la taille des grains n'augmente plus la densité obtenue. Le volume apparent est mesuré au pycnomètre à mercure pour les matériaux durs ; pour les autres on taille des éprouvettes de forme géométrique définie, dont on calcule le volume, à partir des dimensions mesurées.

A partir de maintenant, et pour nous conformer à la terminologie en usage dans la science

du sol, nous emploierons les termes de densité apparente et de densité réelle, aux lieu et place des termes masse volumique apparente et masse volumique réelle.

1. 12. *La porosité ouverte* (GRAS, 1969).

La définition précédente de la porosité fait intervenir seulement le volume des espaces lacunaires, mais non leur communication éventuelle entre eux ou avec l'extérieur. Si généralement on considère qu'un matériau est poreux lorsqu'on peut passer d'une face de ce matériau à une autre en suivant un espace lacunaire (pore vient du grec poros, passage), on peut concevoir l'existence d'espaces lacunaires sans communication avec l'extérieur. Ces espaces ne jouant aucun rôle dans la rétention des liquides, on voit l'insuffisance de la seule notion de porosité totale. Nous introduisons alors la notion de porosité ouverte : *volume des espaces lacunaires communiquant avec l'extérieur, existant dans un certain volume apparent du matériau.*

Pour mesurer cette porosité, nous recherchons une formule analogue à (1), qui, rappelons-le, donne :

$$\text{Volume des pores} = \text{Volume apparent} - \text{Volume réel.}$$

On a, en outre :

$$\text{Volume des pores} = \text{Volume des pores ouverts} + \text{Volume des pores fermés} \quad (6)$$

(6) porté dans la relation précédente (1) donne :

$$\text{Volume des pores ouverts} = \text{Volume apparent} - (\text{Volume réel} + \text{Volume des pores fermés}).$$

En appelant *volume pseudo-réel* la somme du volume réel et du volume des pores fermés, on obtient :

$$\text{Volume des pores ouverts} = \text{Volume apparent} - \text{Volume pseudo-réel}$$

Le volume pseudo-réel est le volume déplacé par l'échantillon immergé dans un fluide qui pénétrerait dans toute la porosité ouverte.

Si l'on admet que la masse de gaz contenue éventuellement dans les pores fermés est négligeable par rapport à la masse du matériau, on a, $m$ étant la masse de l'échantillon :

$$\text{Volume apparent } v_a = \frac{m}{d_a}$$

$$\text{Volume pseudo-réel } v_{pr} = \frac{m}{d_{pr}}, \; d_{pr} = \text{densité pseudo-réelle}$$

$$\text{Porosité ouverte} = \frac{\text{Volume apparent} - \text{Volume pseudo-réel}}{\text{Volume apparent}}$$

$$= \frac{m/d_a - m/d_{pr}}{m/d_a} = 1 - \frac{d_a}{d_{pr}}.$$

$P_0$ étant la porosité ouverte, on obtient :

$$P_0 \text{ (p. 100 volume apparent)} = 100 \left(1 - \frac{d_{pr}}{d_a}\right) \quad (7)$$

$P_f$ étant la porosité fermée, on a, en tenant compte de (6), (5) et (7) :

$$P_f \text{ (p. 100 volume apparent)} = 100 \, d_a \left(\frac{1}{d_{pr}} - \frac{1}{d_r}\right)$$

On retrouve que, lorsque $d_r = d_{pr}$, la porosité fermée est nulle.

Le volume pseudo-réel nécessaire au calcul de la densité pseudo-réelle s'obtient en effectuant, à l'aide d'un pycnomètre à air, une mesure de volume sur un échantillon *non broyé*.

1. 13. *Les catégories de cavités constituant la porosité ouverte* (fig. 1).

Parmi les cavités en communication avec l'extérieur, on peut concevoir l'existence des catégories suivantes :

— les canalicules, pores dont les deux extrémités débouchent sur des faces distinctes du solide, ou sur la même face ;

— les pores en doigt de gant ou en cul-de-sac, pores qui n'ont en quelque sorte qu'une extrémité, débouchant sur une face du solide, ou à l'intérieur d'un autre pore.

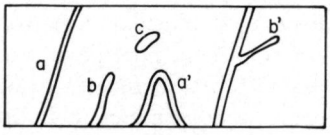



FIG. 1. — *Les différentes catégories de pores*

*a* : canalicule débouchant sur deux faces de l'élément
*a'* : canalicule débouchant sur la même face
*b* : pore en doigt de gant
*b'* : pore en doigt de gant débouchant sur un canalicule
*c* : pore fermé

Ces pores auront un comportement différent vis-à-vis des liquides : le canalicule peut théoriquement se remplir complètement, tandis que, pour le pore en doigt de gant, l'emprisonnement d'air rendra le remplissage incomplet.

Ainsi, il est nécessaire de distinguer les catégories de pores, mais les critères à utiliser dépendent du problème étudié, comme le montrent ces quelques exemples :

Si nous nous intéressons à la transmission de l'eau d'une face à l'autre de l'échantillon, ce ne sont pas tous les canalicules qui sont utiles, mais seulement ceux qui permettent de parvenir d'une face à une autre de l'échantillon ; les canalicules dont les deux extrémités débouchent sur la même face sont sans intérêt. Les pores fermés, inutiles tant pour la rétention que pour la transmission des fluides, sont à prendre en considération lorsqu'on envisage la transmission de la chaleur par l'échantillon.

Pour mesurer le volume des canalicules et des doigts de gant on peut tenter d'utiliser le phénomène d'emprisonnement d'air au moment du remplissage par un liquide. En effet :

— l'humectation progressive de l'échantillon par élévation du niveau d'eau remplit théoriquement les canalicules, puisque l'air peut s'échapper par leur parties supérieures. Par contre, l'eau ne pourra guère pénétrer dans les pores en doigt de gant, à cause de l'air qui y est emprisonné. Une humectation progressive à la pression atmosphérique devrait donc remplir seulement les canalicules.

— en opérant sous vide, l'humectation progressive remplira à la fois les canalicules et les pores en doigt de gant.

La différence entre les volumes d'eau absorbés sous vide et à la pression atmosphérique donnerait donc le volume des pores en doigt de gant.

En fait, il peut y avoir, même avec imbibition progressive, un emprisonnement d'air dans certains canalicules. Nous verrons ultérieurement que ceci se produit fréquemment à cause de la géométrie particulière de certains pores et surtout des connexions qui existent entre eux. La différence entre les volumes d'eau absorbés sous vide et à la pression atmosphérique est la somme du volume des pores en doigt de gant et de l'air emprisonné dans les canalicules.

Par ailleurs, les pores en doigt de gant se remplissent un peu à l'air libre, la pénétration de l'eau dépendant de l'équilibre qui s'établit au niveau de l'interface air-eau entre la pression capillaire de l'eau (et éventuellement la pression hydrostatique) et la pression de l'air emprisonné. Pour les raisons précédentes, nous n'avons pas tenté de mesurer le volume des pores en doigt de gant.

1. 14. *Caractéristiques morphologiques et dimensionnelles de la porosité.*

Elles constituent ce qu'on appelle la *porométrie* (*).

La morphologie des pores est en toute rigueur susceptible seulement d'une description après examen à des grossissements adaptés à la taille des pores considérés : examen direct à l'œil nu, à la loupe binoculaire, examen de plaques minces au microscope optique. On peut aussi se faire une idée de la constitution du milieu poreux en examinant une surface de fracture du matériau au microscope électronique à balayage qui permet de voir le relief.

Les dimensions réelles des pores ne peuvent être déterminées que par un examen direct. Comme la section d'un pore, par exemple, n'est pas une figure géométrique simple, il est nécessaire de disposer de plusieurs mesures pour le décrire convenablement. On cherche alors à caractériser un pore par un nombre réduit de dimensions (par exemple, longueur et diamètre). Ceci revient à assimiler l'espace poral à une juxtaposition de volumes géométriques simples (cylindres, par exemple).

La notion de rayon équivalent permet de caractériser les dimensions transversales des pores par un paramètre unique. Pour calculer ce rayon équivalent, on peut avoir recours à des considérations géométriques : le rayon équivalent est alors le rayon du cercle ayant la même surface que la section du pore réel.

On peut aussi avoir recours à un phénomène physique. Si l'on se place, par exemple, du point de vue de la pression capillaire $p$ existant au niveau de l'interface air-eau dans un pore, le rayon équivalent se calcule par la loi de Laplace.

$$p = \frac{2\ T_{EA} \cos \theta}{r},$$

$p$ étant la pression capillaire existant dans le pore réel et $r$ le rayon du capillaire cylindrique équivalent dans lequel la pression capillaire serait $p$ ; $T_{EA}$ est la tension interfaciale eau air ou tension superficielle de l'eau et $\theta$ l'angle de raccordement eau-solide. Par des considérations hydrodynamiques, on définirait de même un rayon hydraulique moyen. On conçoit facilement que l'on n'obtienne pas, pour un pore donné, la même valeur du rayon équivalent selon le principe de calcul et la méthode de mesure utilisés.

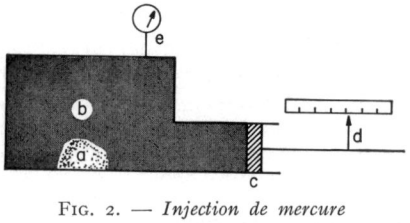



FIG. 2. — *Injection de mercure*

*a* : corps poreux
*b* : mercure
*c* : piston
*d* : mesure du volume de l'enceinte
*e* : mesure de pression

Nous avons défini ici le rayon équivalent des pores au moyen de la formule de Laplace, en utilisant l'injection de mercure. Elle consiste à forcer le mercure, liquide non mouillant, à pénétrer dans les pores. A cet effet, l'échantillon est placé dans une enceinte, dans laquelle on fait le vide, avant d'introduire le mercure. On augmente progressivement la pression appliquée au mercure, en notant la diminution de volume correspondante (fig. 2). Au fur et à mesure que la pression

(*) D'après l'Académie des Sciences (t. 264 de 1967), la porométrie est la mesure des formes ou des dimensions des pores d'un matériau ; la porosimétrie est la mesure de la répartition des pores dans un matériau.

augmente, le mercure envahit des pores de diamètre de plus en plus petits. On obtient donc une courbe volume des pores pression appliquée ; on passe de la pression appliquée au rayon équivalent par la loi de Laplace : $p = -2\ T \cos \theta / r$ avec T : tension interfaciale vide mercure, $\theta$ : angle de raccordement mercure matériau. Ici, on a pris T : 480 dynes·cm et $\theta$ : 140°.

Cette méthode ne permet pas de mesurer les rayons des pores larges, ceux-ci étant spontanément envahis par le mercure du seul fait de la pression hydrostatique : par exemple, dans le vide, les pores de 500 $\mu$ placés à 1 cm de la surface libre du mercure sont remplis. La courbe « volume occupé par le mercure-rayon équivalent des pores » est donc construite en prenant pour volume maximal des vides, la fraction du volume poral qui n'est pas envahie par le mercure au début de l'opération. Cette courbe n'est donc complète que pour les matériaux ayant des pores suffisamment étroits. on calcule que la valeur limite du rayon est de l'ordre de 25 $\mu$.

Remarquons aussi que du fait de l'épaisseur de l'échantillon, la pression est plus élevée à sa base qu'à son sommet : le mercure pénétrera donc dans des pores d'autant plus étroits que leurs ouvertures seront plus proches de la base de l'échantillon. Une pression telle que les pores de 20 $\mu$ soient envahis au sommet de l'échantillon, sera augmentée 2 cm plus bas de 13,6 × 2 g/cm², ce qui correspond à un rayon de 18,5 $\mu$.

Comme pour un milieu donné les pores ont des dimensions différentes, il faut considérer une courbe de répartition des rayons équivalents. Appliquons au mercure des pressions successives croissantes $p_1\ p_1, \ldots\ p_i \ldots$ A la pression $p_i$, tous les capillaires dont le rayon équivalent est supérieur à $r_i$ $\left(\text{tel que } p_i = \dfrac{2\ T \cos \theta}{r_i}\right)$ sont remplis ; en appliquant la pression supérieure $p_{i+1}$, on fera pénétrer un volume de mercure correspondant à celui des capillaires de rayon équivalent compris entre $r_i$ et $r_{i+1}$. En portant sur un graphique la quantité de mercure qui a pénétré dans l'échantillon et le rayon correspondant, on obtient une *courbe cumulative de répartition des volumes des pores ouverts* (fig. 3). On peut exprimer le volume de mercure en p. 100 de la porosité ouverte de

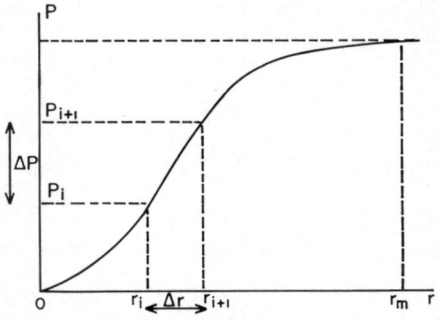



FIG. 3. — *Courbe cumulative théorique de répartition des pores*
P : porosité ouverte
$r$ : rayon équivalent

l'échantillon : l'ordonnée d'un point de la courbe d'abscisse $r$ donne le p. 100 de la porosité due aux pores de rayons équivalents inférieurs à $r$. Le rayon équivalent maximal est l'abscisse de la courbe cumulative correspondant à 100 p. 100 de la porosité ouverte. A l'intervalle de rayon $\Delta r$ correspond l'intervalle de porosité $\Delta P$. La porosité due aux pores de rayon compris entre 0 et $r$ est $\Sigma_0^r\ \Delta\ P$ ou à la limite $\int_0^r dP = \int_0^r f(r)\ dr$. *La courbe de répartition* proprement dite sera $\dfrac{dP}{dr} = f(r)$ ; pour chaque valeur $r$ de l'abscisse, son ordonnée est la pente $\dfrac{dP}{dr}$ de la courbe cumulative.

La prise en considération du rayon équivalent permet, par une simplification de la réalité, d'accéder à un paramètre permettant de comparer des dimensions, du moins lorsque les configurations de la porosité ne sont pas trop différentes d'un matériau à l'autre.

### 1. 2. — *Caractéristiques de la porosité des matériaux étudiés*

Les matériaux grossiers poreux ont été choisis en raison de leurs propriétés différentes :

— Matériaux artificiels
- verre mousse (*)
- brique réfractaire
- verre fritté n° 3
- verre fritté n° 4
- verre fritté n° 5
- porcelaine
- brique
- massifs de billes de verre agglomérées par chauffage jusqu'au début de fusion.

— Matériaux naturels
- pierre ponce
- calcaire à milioles
- craie
- lave andésitique
- pouzzolane.

Les valeurs moyennes obtenues pour les densités apparentes et réelles sont données dans le tableau 1. Dans le tableau 2, on indique les valeurs des porosités et du rayon maximum des pores.

TABLEAU I

*Densités apparentes et réelles des matériaux*

| Matériau | Densité apparente | Densité réelle |
|---|---|---|
| Verre mousse ..... | 0,41 | 2,53 |
| Pouzzolane ..... | 1,12 | 3,35 |
| Brique réfractaire ..... | 1,17 | 2,76 |
| Verre fritté n° 4 ..... | 1,28 | 2,24 |
| Porcelaine ..... | 1,56 | 3,05 |
| Verre fritté n° 3 ..... | 1,58 | 2,22 |
| Craie..... | 1,59 | 2,73 |
| Calcaire à milioles..... | 1,61 | 2,74 |
| Verre fritté n° 5 ..... | 1,62 | 2,29 |
| Brique ..... | 1,70 | 2,71 |
| Billes de verre : | | |
| 50- 63 μ .... | 1,76 | 2,98 |
| 100- 125 μ .... | 1,81 | 2,82 |
| 200- 225 μ .... | 1,67 | 2,67 |
| 400- 500 μ .... | 1,77 | 2,68 |
| 1 000-1 250 μ .... | 1,70 | 2,67 |
| Lave andésitique ..... | 2,24 | 2,80 |

(*) Obligeamment fourni par la Compagnie Saint-Gobain.

Les courbes cumulatives de répartition des rayons des pores ont été déterminées par injection de mercure (fig. 4). Ces courbes sont incomplètes pour les matériaux dont les pores ont des rayons supérieurs à 25 μ : calcaire à milioles, brique réfractaire, lave andésitique, pierre ponce, verre mousse, pouzzolane, massif de billes de verre.

On a alors tenté de caractériser tous les matériaux par le « rayon maximal des pores » (tabl. 2), qui est ainsi défini :

— rayon équivalent maximal des pores mesurés sur la courbe cumulative de répartition obtenue par injection de mercure, pour les matériaux à pores étroits ($r < 25$ μ),

— rayon des billes de verre,

— demi-dimension maximale transversale des pores pour les matériaux autres que les précédents. Cette dimension a été évaluée par observation à la loupe binoculaire munie d'une échelle

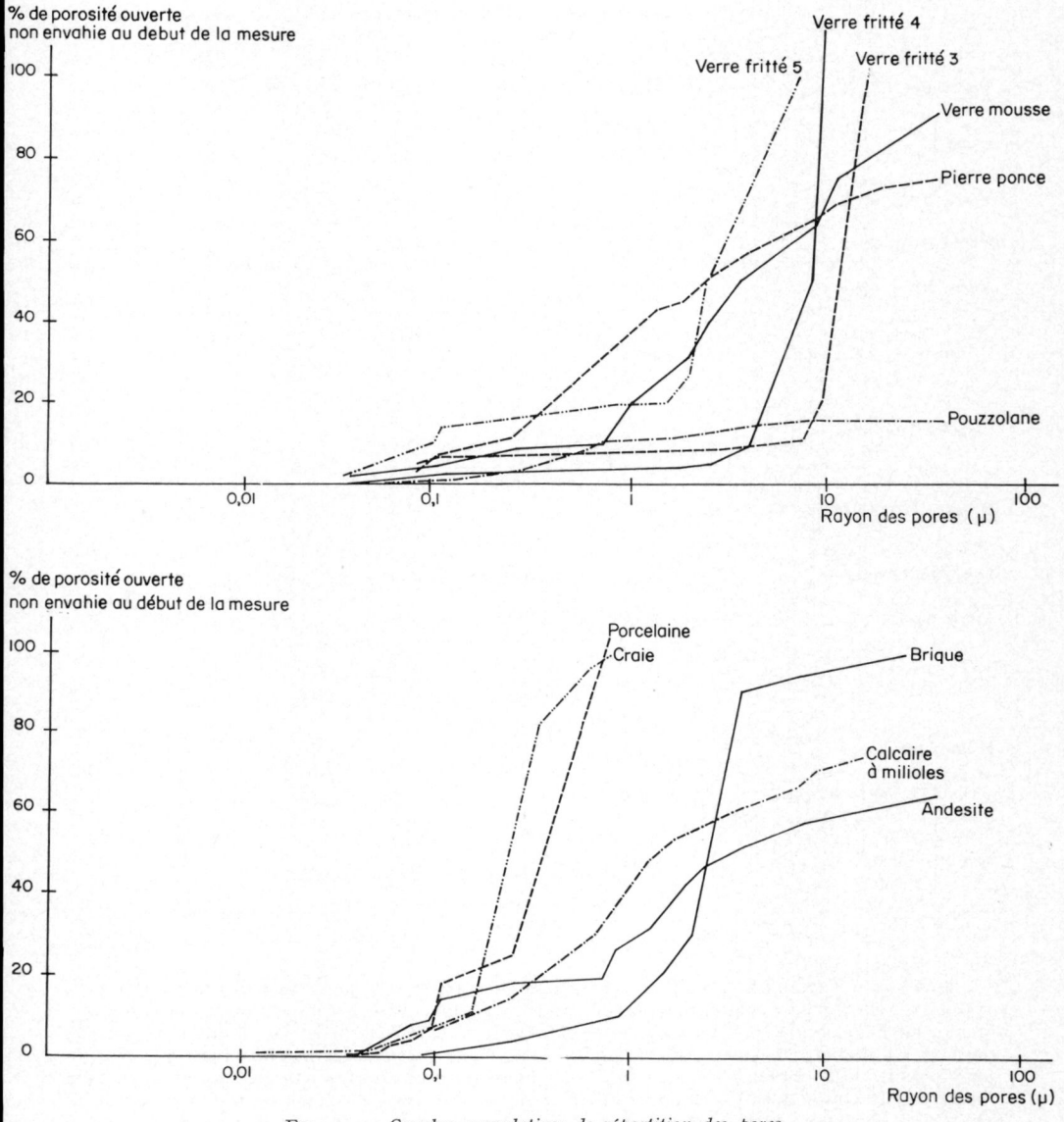



FIG. 4. — *Courbes cumulatives de répartition des pores*

micrométrique en éliminant les cavités de dimension transversale supérieure à 2 mm. On a vérifié pour le verre mousse et la pierre ponce pourvus d'une porosité fermée que les gros pores n'étaient pas tous fermés: lorsqu'on recouvre quelques-uns de ces gros pores par une goutte d'eau, celle-ci disparaît absorbée par les canalicules débouchant dans ces gros pores.

TABLEAU 2

*Caractéristiques de la porosité des divers matériaux*

| Matériaux | Porosité totale (% volume apparent) | Porosité ouverte (% volume apparent) | Rayon maximal des pores (μ) |
|---|---|---|---|
| Porcelaine | 48,6 | 48,6 | 0,7 |
| Craie *a* | 43,6 | 43,6 | 0,8 |
| Craie *b* | 43,6 | 43,6 | |
| Verre fritté n° 5 | 31,8 | 31,8 | 7,2 |
| Verre fritté n° 4 | 42,7 | 42,7 | 9,0 |
| Verre fritté n° 3 | 28,9 | 28,6 | 15,9 |
| Brique *a* | 37,0 | 36,4 | 24,5 |
| Brique *b* | 36,6 | 35,3 | |
| Brique *c* | 37,0 | 36,0 | |
| Calcaire à milioles *a* | 40,9 | 40,9 | 250 |
| Calcaire à milioles *b* | 41,7 | 41,6 | |
| Brique réfractaire *a* | 57,3 | 55,9 | 250 |
| Brique réfractaire *b* | 57,7 | 57,2 | |
| Brique réfractaire *c* | 57,7 | 56,4 | |
| Lave andésitique | 19,6 | 19,6 | 500 |
| Pierre ponce | 75,0 | 69,5 | 500 |
| Verre mousse *a* | 84,2 | 75,4 | 500 |
| Verre mousse *b* | 83,4 | 71,7 | |
| Verre mousse *c* | 83,4 | 72,9 | |
| Pouzzolane | 66,5 | 64,7 | 1 000 |
| Billes de verre 50- 63 μ | 36,6 | 36,6 | 50 |
| Billes de verre 100- 125 μ | 35,8 | 35,8 | 100 |
| Billes de verre 200- 225 μ | 36,3 | 36,3 | 200 |
| Billes de verre 400- 500 μ | 34,2 | 34,2 | 400 |
| Billes de verre 1 000-1 250 μ | 36,0 | 36,0 | 1 000 |

Pour les matériaux à pores larges, la différence entre le volume de la porosité ouverte et le volume qui n'est pas envahi par le mercure au début de la mesure, est importante pour la pouzzolane et moindre pour la pierre ponce, le verre mousse, l'andésite et le calcaire à milioles. Pour ces derniers matériaux, on est surpris du faible volume représenté par les gros pores, compte tenu de leur aspect : les différences entre l'ordonnée maximale des courbes cumulatives et la porosité ouverte sont très faibles, ce qui tendrait à indiquer que les gros pores représentent un faible volume. Il faut faire intervenir un phénomène signalé par FATT (1956) : lorsque de gros pores

communiquent avec l'extérieur par l'intermédiaire de petits pores, ces gros pores ne sont remplis que lorsque la pression du mercure atteint la pression d'entrée dans les petits pores ; le volume de ces gros pores est donc mesuré avec celui des petits.

## II. — HUMECTATION DIRECTE PAR L'EAU

Nous allons humecter maintenant les éléments poreux, en les mettant directement au contact de l'eau libre, de façon à faire apparaître leurs caractéristiques propres. Celles-ci éclaireront éventuellement leur comportement, lorsque l'humectation se fera par l'intermédiaire du milieu meuble. Avant de faire cette étude, nous examinerons les problèmes posés par les mesures d'humidité.

### 2. 1. — *Critique de la mesure d'humidité*

On a caractérisé l'humidité par dessiccation à l'étuve, ce qui du point de vue de la mesure ne présente pas de difficulté. Mais pour effectuer cette mesure, il faut retirer l'échantillon de l'eau. On peut se demander si, au moment de ce retrait, on ne risque pas de perdre de l'eau qui s'échapperait des pores de grandes dimensions par ressuyage spontané. Ceci nous a conduit à étudier ce problème sur les massifs de billes de verre. Ces massifs ont été immergés dans un récipient d'eau et on a vérifié que leur remplissage était total puisque ces massifs déplaçaient un volume d'eau égal et non supérieur à leur volume réel. Une fois ces échantillons retirés de l'eau, la mesure pondérale de leur humidité a mis en évidence un ressuyage spontané, d'autant plus important que le rayon des billes (et donc des pores) est plus grand (tabl. 3).

TABLEAU 3

*Ressuyage spontané de massifs de billes de verre à la sortie de l'eau*

| Rayon des billes ($\mu$) (valeurs extrêmes) | Degré de remplissage (volume d'eau retenue rapporté au volume des vides et exprimé en p. 100) |
|---|---|
| 25-31 | 92,4 |
| 50-62 | 95,3 |
| 100-112 | 84,5 |
| 200-230 | 76,9 |
| 500-625 | 58,9 |

Il existe une liaison négative significative au seuil 5 p. 100 entre le degré de remplissage G (volume d'eau retenu exprimé en pour cent du volume des pores ouverts) et le rayon moyen des billes $c$ ($\mu$).

$$G = -0{,}065\ c + 94{,}19$$

Cette régression s'interprète facilement en admettant que la pression capillaire intervient dans la rétention de l'eau, puisque cette pression est d'autant plus faible

que le rayon des pores est plus grand. On peut donc s'attendre à ce que, lors du retrait de l'échantillon de l'eau, une partie de celle-ci s'écoule par gravité des échantillons à gros pores.

La vidange spontanée des gros pores est donc appréciable pour les billes de verres : par exemple, pour le massif ayant des pores de dimensions transversales maximales 500 $\mu$, 60 p. 100 de la porosité seulement restent occupés par l'eau, au moment de la pesée de l'échantillon.

Cette perte d'eau est beaucoup moins importante pour les autres matériaux naturels ou artificiels qui ont été étudiés, puisqu'on mesure souvent, pour des échantillons ayant des pores de diamètre 100 $\mu$, un degré de saturation de la porosité supérieur à 80 p. 100. Nous vérifierons ultérieurement que la perte d'eau est effectivement faible pour ces échantillons.

Nous avons donc continué à doser l'humidité par voie pondérale après dessiccation à l'étuve.

Pour juger du degré de remplissage de la porosité par l'eau, on a rapporté l'humidité à la porosité. Comme l'humidité H (en p. 100 du poids sec) est le volume d'eau ($cm^3$) existant dans 100 g de matériau occupant le volume apparent $100 \cdot d_a^{-1}$ (poids = volume apparent $\cdot d_a^{-1}$), on a :

$$\text{Humidité (p. 100 volume apparent)} = \frac{\text{humidité (p. 100 poids sec)}}{100 \cdot d_a^{-1}} \cdot 100, \text{ soit :}$$

$$\text{Humidité (p. 100 volume apparent)} = \text{humidité (p. 100 poids sec)} \; d_a$$

### 2. 2. — *Influence de la pression de l'air et de la durée d'humectation*

Nous avons opéré sur des éléments parallélépipédiques sensiblement de mêmes dimensions (section carrée de 2 à 3 cm de côté, hauteur 4 cm) (*).

#### 2. 21. *Humectation brutale à l'air.*

L'échantillon est placé dans un bécher étroit, qui est rempli brutalement en versant l'eau sur l'échantillon. On se place ainsi dans des conditions très défavorables au point de vue de la sortie de l'air de l'échantillon, puisqu'il est environné d'eau sur toutes ses faces, presque immédiatement.

On constate alors un dégagement gazeux plus ou moins intense ou long suivant les échantillons. Pour ceux dont le dégagement gazeux est faible, le dosage de l'humidité 48 heures après l'immersion montre qu'une faible fraction de la porosité ouverte est occupée, et donc qu'il y a un emprisonnement d'air considérable. *Pour tous les échantillons*, il y a, lors de l'humectation, une phase *emprisonnement d'air*, l'air étant considéré comme emprisonné lorsqu'un volume d'air est séparé de l'atmosphère par une paroi solide ou liquide.

Cette phase est suivie d'une *expulsion de l'air* emprisonné, et c'est la teneur en air à l'issue de cette phase qui permet de classer les matériaux :

— pour la brique et la craie, par exemple, la quasi-totalité de l'air est expulsée en quelques minutes environ et le remplissage de la porosité ouverte est presque complet. L'emprisonnement d'air est un épisode de courte durée ;

(*) Les échantillons d'andésite et de pouzzolane n'ont pas été façonnés en forme de parallélépipède.

— pour d'autres matériaux, l'expulsion de l'air est faible et, de ce fait, la quantité d'air emprisonné lors de la phase initiale diminue peu.

En définitive, il y a toujours initialement emprisonnement d'air, mais son expulsion est plus ou moins complète selon le matériau.

La première colonne du tableau 4 permet de comparer les remplissages obtenus après 48 heures de séjour dans l'eau.

2. 22. *Humectation à l'air avec précaution pendant 48 heures.*

Les échantillons sont placés à plat dans un récipient dans lequel on élève progressivement le niveau de l'eau, l'élément étant submergé au bout de 6 heures. On mesure l'humidité de l'échantillon 48 heures après la submersion totale. Presque pour tous les échantillons, l'humidité est plus élevée que celle des cas précédents (tabl. 4).

Cette amélioration tient à ce que la quantité d'air emprisonnée initialement est plus petite, celui-ci pouvant s'échapper par la partie supérieure de l'échantillon non encore immergé.

2. 23. *Humectation sous vide avec précaution pendant 48 heures.*

On a cherché à obtenir un remplissage aussi complet que possible en utilisant un récipient étanche ainsi aménagé (fig. 5) : à quelque distance du fond est placée une plaque de porcelaine poreuse, sur laquelle on dispose l'échantillon. Trois tubulures existent : l'une pour faire le vide, l'autre pour l'amenée d'eau et la troisième pour le branchement d'un manomètre à mercure.

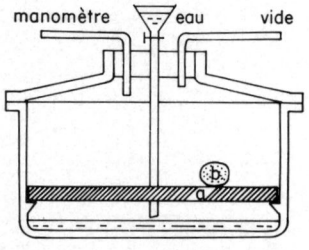



FIG. 5. — *Appareil pour humectation sous vide*
*a* : plaque poreuse *b* : corps poreux à humecter

L'humectation se déroule de la façon suivante :

— l'échantillon étant placé dans l'enceinte, on y fait le vide pendant 4 heures ;

— de l'eau dégazée est ensuite introduite dans l'enceinte de façon à obtenir une atmosphère humide. L'échantillon est maintenu ainsi pendant 15 heures environ ;

— le niveau d'eau est élevé progressivement. Lorsque ce niveau atteint la plaque poreuse, l'élément est humecté par capillarité, puis submergé. Entre le début de l'humectation par capillarité et la submersion s'écoulent environ 6 heures ;

— l'échantillon reste submergé pendant 24 heures, le vide étant maintenu.

Une plus grande fraction de la porosité ouverte est ainsi remplie, au moins 95 p. 100, sauf pour le calcaire à milioles (92,5 p. 100), le verre fritté n° 4 (89 p. 100) et le verre mousse (70 p. 100) ; cependant, avec ce dernier matériau, la reproductibilité est mauvaise et on atteint parfois 95 p. 100.

TABLEAU 4

*Humidité des éléments*

exprimée en p. 100 du volume apparent (nombre de gauche)
et en p. 100 de la porosité ouverte (nombre de droite italique)

| Matériaux | Humectation à l'air | | | | | | Humectation sous vide | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Brutale immersion 48 heures | | Avec précaution, immersion 48 heures | | Avec précaution, immersion 30 jours | | Avec précaution, immersion 48 heures | | Avec précaution, immersion 30 jours | |
| Porcelaine | 42,7 | *87,8* | 45,9 | *92,4* | 46,6 | *95,9* | 46,6 | *95,8* | 46,5 | *95,6* |
| Craie *a* | 39,4 | *90,3* | 41,3 | *94,7* | — | | 41,7 | *95,6* | — | |
| Craie *b* | 42,4 | *97,2* | 44,4 | *100* | 45,9 | *100* | 43,6 | *100* | 441, | *100* |
| Verre fritté n° 4 | | | 38,4 | *89,9* | 39,2 | *91,8* | 37,3 | *87,3* | 39,1 | *91,5* |
| Verre fritté n° 3 | | | 25,4 | *88,8* | 27,9 | *97,5* | | | | |
| Brique *a* | | | 32,8 | *90,1* | — | | 34,9 | *95,9* | | |
| Brique *b* | 30,0 | *84,9* | 33,1 | *93* , | 35,2 | *99,7* | 35,0 | *99,1* | 35,1 | *99,4* |
| Brique *c* | 29,5 | *31,9* | 32,9 | *91,4* | — | | 34,8 | *96,6* | | |
| Calcaire à milioles *a* | 11,0 | *26,8* | 13,9 | *33,9* | — | | 37,2 | *90,9* | | |
| Calcaire à milioles *b* | 12,2 | *29,3* | 14,2 | *34,1* | 20,2 | *48,5* | 38,5 | *92,5* | 38,8 | *93,3* |
| Brique réfractaire *a* | 39,6 | *71,5* | 43,6 | *78,0* | — | | 48,4 | *86,6* | — | |
| Brique réfractaire *b* | 39,5 | *69,0* | 44,5 | *77,8* | — | | 49,8 | *87,0* | — | |
| Brique réfractaire *c* | 39,6 | *70,2* | 34,9 | *77,8* | 49,1 | *87,0* | 49,8 | *88,3* | 49,8 | *88,3* |
| Lave andésitique | 7,5 | *38,2* | 10,1 | *51,5* | 14,3 | *72,9* | 19,0 | *96,9* | 20,4 | *100* |
| Pierre ponce | 23,1 | *33,2* | 30,8 | 44,3 | 30,4 | 58,1 | 63,1 | 90,7 | 62,3 | 89,6 |
| Verre mousse *a* | 4,4 | *5,8* | 22,8 | *30,2* | 23,60 | *31,3* | 59,6 | *79,0* | 72,6 | *96,2* |
| Verre mousse *b* | 8,4 | *11,7* | 10,6 | *14,7* | 15,00 | *20,9* | 37,6 | *52,4* | | |
| Verre mousse *c* | 9,7 | *13,3* | — | | — | | | | | |

Cette façon de procéder permet de remplir théoriquement la quasi-totalité de la porosité ouverte, qu'il s'agisse de canalicules ou de doigts de gants.

Certaines manipulations précédentes ont été reprises en augmentant leur durée ; nous allons examiner leurs résultats

2. 24. *Humectation à l'air avec précaution pendant 30 jours.*

On opère comme en 2. 22, mais en pesant l'élément tous les 7 jours. Pour presque tous les éléments, l'humidité a d'abord augmenté pour atteindre un palier par la suite. Les différences entre l'humidité au bout de 2 jours et de 30 jours sont surtout sensibles pour le verre mousse et la pierre ponce. Certains éléments comme le verre mousse n'atteignent pas de palier au bout de 49 jours.

2. 25. *Humectation sous vide avec précaution pendant 30 jours.*

Lorsque la durée passe de 2 à 30 jours, la quantité d'eau absorbée n'augmente que pour le verre mousse. L'humectation sous vide avec précaution pendant 48 heures permet donc d'obtenir à un remplissage caractéristique de l'élément poreux dans la quasi-totalité des cas.

2. 26. *Emprisonnement d'air, durée de submersion et variations de température.*

Dans l'expérience d'humectation à l'air avec précaution, on a constaté que, pour certains éléments comme le verre mousse, l'équilibre n'était pas atteint au bout de 49 jours. Dans cette expérience, les éléments étaient retirés de l'eau tous les 7 jours pour mesurer leur humidité.

Nous avons repris l'expérience précédente pour le verre mousse, mais en modifiant les conditions expérimentales. On place une cuve à dégagement au-dessus de l'échantillon (fig. 6), de façon à suivre le dégagement gazeux en fonction du temps,

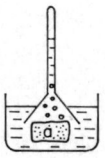


FIG. 6. — *Étude de l'expulsion d'air*
*a* : corps poreux

sauf tout à fait au début. L'ensemble est placé dans un bac maintenu à la température constante de 30°C par un élément de chauffage à thermostat. Le dégagement gazeux est suivi par visée au cathétomètre du niveau d'eau dans le tube : ce niveau ne variait plus au bout de 6 jours environ. Ceci est en contradiction avec les résultats de l'expérience de submersion de 49 jours, pour deux raisons : la quantité d'air expulsée est beaucoup plus faible dans l'expérience isotherme et l'équilibre est atteint beaucoup plus rapidement.

On a alors modifié ainsi l'expérience : le chauffage du bac a été arrêté de temps à autre, ce qui amenait une diminution de la température de l'eau jusqu'à 26 ou 21° selon les cas ; la remise en route du chauffage élevait la température à 30°C. Au cours du réchauffement de l'eau, on observait un dégagement gazeux important (1/10 à 5/10 de $cm^3$) et ce phénomène s'est reproduit chaque fois qu'on a répété cette

opération, l'expérience ayant duré 27 jours et le dégagement total étant de 3,5 $cm^3$. Comme à aucun moment la température n'a dépassé 30°C, ce n'est pas la dilatation des bulles qui a facilité leur expulsion, mais plutôt les variations de volume qui ont provoqué leur décrochement des aspérités des pores.

Dans l'expérience non isotherme décrite en 2. 24, le fait de retirer les échantillons de l'eau produisait une diminution de la pression hydrostatique lors du retrait et une augmentation lors de l'immersion, qui devaient certainement entraîner une variation de volume des bulles facilitant leur expulsion.

Dans le milieu naturel il est probable que le dégazage des corps poreux immergés se poursuit lentement dans le temps, en grande partie à cause des variations de températures.

Il est aussi possible qu'au cours du temps, il y ait une certaine diffusion de l'air des bulles jusqu'à l'atmosphère extérieure. Comme l'air des bulles est comprimé par les actions capillaires, la solubilité de l'air dans l'eau augmente localement. La teneur en air de l'eau a tendance à s'homogénéiser par diffusion, et lorsque le seuil de solubilité est atteint il y a sortie d'air vers l'atmosphère. Ce processus, qui doit cesser lorsque la pression de l'air emprisonné est égale à celle de l'air atmosphérique, ne paraît pas avoir une grande importance, du moins lorsque l'eau est immobile.

2. 27. *Classement des matériaux suivant la façon dont ils se remplissent.*

Les matériaux poreux étudiés peuvent se classer schématiquement en deux groupes. Pour les uns, la porosité ouverte se remplit presque complètement d'eau, quelles que soient les conditions. Les autres ont leur porosité ouverte remplie de façon très incomplète. Comme l'humectation sous vide améliore en général le degré de saturation, c'est bien la quantité d'air emprisonné qui est différente dans ces deux groupes de matériaux.

L'humectation brutale des matériaux a permis de montrer que l'emprisonnement d'air définitif résultait de deux processus successifs :

— emprisonnement d'air initial : à son terme, il existe dans le volume poral des bulles d'air sans communication avec l'atmosphère. Cette phase existe pour tous les matériaux ;

— expulsion plus ou moins complète de l'air emprisonné au cours de la phase précédente. C'est la deuxième phase qui permet de classer en première approximation les matériaux en deux groupes. Pour les uns, l'expulsion de l'air quasi instantanée provoque un remplissage presque total de l'échantillon. Dans le cas des autres, l'expulsion d'air est beaucoup moins intense et aboutit à un remplissage très incomplet. L'expulsion d'air peut être facilitée par des variations de température.

## III. — ÉTUDE PARTICULIÈRE DE L'EMPRISONNEMENT D'AIR

Maintenant que nous venons de montrer l'importance des mécanismes régissant l'emprisonnement d'air sur le remplissage incomplet de certains matériaux, nous allons étudier plus particulièrement ce phénomène dans des conditions se rapprochant de celles du milieu naturel : l'humectation à la pression atmosphérique avec précaution.

### 3. 1. — *Explication des différences d'emprisonnement d'air entre les matériaux*

Quoique la perte d'eau par ressuyage spontané des gros pores semble assez faible (section 2. 1), nous avons évalué ici le degré de remplissage de la porosité sans sortir l'échantillon de l'eau.

A cet effet, on place l'échantillon sec dans un pycnomètre à large ouverture, dit de Hobarth, dont on connaît le volume. On compare le volume du récipient à la somme « volume réel de l'échantillon + volume de l'eau utilisée pour remplir le récipient contenant l'échantillon ».

L'égalité : volume du pycnomètre = volume réel de l'échantillon + volume de l'air emprisonné + volume d'eau ajoutée, permet d'accéder au volume d'air emprisonné, les autres quantités étant connues par pesée.

L'humectation des échantillons a été réalisée avec précaution de façon à limiter le plus possible l'emprisonnement d'air : on a élevé progressivement le niveau de l'eau de façon à provoquer la submersion au bout de 6 heures. Les mesures ont été effectuées 7 heures après le début de l'humectation.

Le volume d'air emprisonné a été rapporté à la porosité ouverte de chaque matériau. On obtient ainsi le volume d'air emprisonné en p. 100 du volume des vides en communication avec l'extérieur. Les mesures ont été répétées plusieurs fois et on a constaté que l'emprisonnement d'air est caractéristique de chaque matériau.

Ces matériaux se classent en deux catégories :

— ceux qui se remplissent complètement : les massifs de billes de verre ;

— les autres, pour lequel le volume d'air emprisonné varie entre 8,6 et 82 p.100 de la porosité ouverte (12 échantillons).

Pour tenter d'expliquer les différences existant dans le second groupe, on a considéré les différences de mouillabilité et de rayon des pores.

### 3. 11. *Mouillabilité.*

L'angle de raccordement $\theta$ solide eau permet de caractériser la mouillabilité. Il est nul dans le cas de la mouillabilité parfaite, c'est-à-dire lorsque le liquide s'étale complètement sur le solide. Dans les autres cas, cet angle peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 180°.

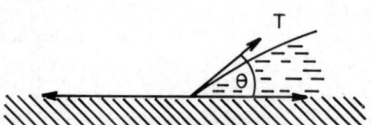



FIG. 7. — *Angle de raccordement solide liquide*

L'étude de l'équilibre du bord d'une goutte d'eau sous l'influence des tensions interfaciales solide air $T_{SA}$, solide eau $T_{SE}$ et eau air $T_{EA}$ ($T_{SA} = T_{SE} + T_{EA} \cos \theta$) conduit à considérer le cosinus de cet angle de raccordement.

$$\cos \theta = (T_{SA} - T_{SE})/T_{EA} = W_{SE}/T_{EA} \qquad \text{(fig. 7)}$$

Ce cosinus est le quotient de l'énergie d'adhésion solide liquide $W_{SE}$ (travail nécessaire pour transformer l'unité d'aire d'interface solide air en interface solide liquide) par la tension interfaciale eau air ou tension superficielle du liquide.

Lorqu'on veut mesurer cet angle de raccordement, une première difficulté provient du fait que la surface solide est rarement plane, d'où la prise en considération d'un angle apparent de raccordement $\theta'$ (fig. 8). WENZEL (1936), en introduisant la notion de rugosité macroscopique

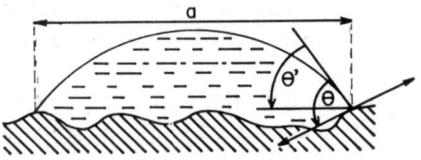



FIG. 8. — *Angle de raccordement réel* $\theta$ *et apparent* $\theta'$
*a* : trace de l'aire apparente

(rapport entre l'aire réelle du solide et l'aire apparente de son envelope), a donné la relation liant $\theta$ et $\theta'$ : $\cos \theta' = r \cos \theta$. Elle entraîne pour

$$\theta < 90^\circ \qquad \theta' < \theta$$
$$\theta > 90^\circ \qquad \theta' > \theta$$

Si la hauteur des aspérités de la surface augmente, il peut y avoir occlusion d'air et la relation entre $\theta$ et $\theta'$ fait alors intervenir l'aire $f_1$ de l'interface solide liquide et l'aire $f_2$ de l'interface liquide air (fig. 9) :

$$\cos \theta' = f_1 \cdot \cos \theta - f_2$$

Cette formule fut établie par CASSIE et BAXTER (1944) pour des réseaux de fibres textiles dans un cas où la mouillabilité était faible. Cette formule n'est donc pas utilisable dans le cas de corps poreux pour lesquels l'eau pénètre dans les pores aboutissant à la surface, ce qui est notre cas. Par ailleurs, lorsqu'on dépose à la surface d'un corps poreux une goutte d'eau, elle disparaît si le corps a une certaine mouillabilité et toute mesure est de ce fait impossible. Nous avons tourné

FIG. 9. — *Cas complexe : interfaces eau solide et eau air*

cette difficulté en injectant une bulle d'air sous une face de l'échantillon immergé (fig. 10) ; la projection sur un écran de l'image de la bulle permet de mesurer un angle de raccordement. Mais comme l'eau a pénétré dans les pores, la formule de CASSIE et BAXTER n'est plus utilisable. L'attitude qui a été enfin adoptée revient à mesurer un certain angle de raccordement dans des conditions particulières, en espérant qu'il est en corrélation avec l'angle réel. Le cosinus de cet angle de raccordement constitue donc seulement un indice de mouillabilité. Il varie entre 0,72 et 0,96 pour les matériaux étudiés ici.

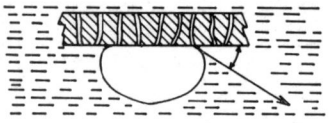


FIG. 10. — *Mesure d'un angle de raccordement par la méthode de la bulle*

Conjointement, en s'inspirant d'une méthode de TURC, nous avons essayé d'accéder à la mouillabilité de la matière elle-même. Pour cela, on a examiné le franchissement de l'interface air eau par le matériau réduit en poudre passant à travers un tamis de 50 $\mu$. Chaque particule est soumise à son poids apparent (différence entre son poids et la poussée d'Archimède) et à la résultante des

forces superficielles appliquées le long du périmètre de raccordement solide liquide (fig. 11). Les particules des corps mouillables pénètrent dans le liquide, tandis que celles des corps peu mouillables restent à la surface. Pour les matériaux étudiés, on n'a pas constaté de différences aussi tranchées, mais des durées différentes pour que la totalité de la poudre franchisse l'interface. Finalement, on a mesuré la masse de poudre qui a franchi l'interface air eau 15 secondes après le dépôt sur cet interface. L'indice de mouillabilité, rapport de cette quantité à la quantité totale apportée, varie de 8 à 86 p. 100.

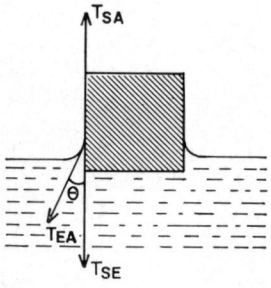



FIG. 11. — *Particule en équilibre à l'interface air eau*

3. 12. *Rayon maximum des pores.*

Comme nous l'avons déjà vu, chaque matériau ne peut se caractériser par un diamètre de pore, mais par une courbe de répartition de ces diamètres. Si cette courbe de répartition était normale, on pourrait utiliser la moyenne comme paramètre caractéristique ; en fait, il en est rarement ainsi, les courbes étant souvent plurimodales. Par ailleurs, pour les matériaux ayant des pores larges, la partie de la courbe de répartition relative à ces pores n'est pas connue. Aussi avons-nous finalement pris comme indice le rayon maximal des pores précédemment défini (section 1. 2).

3. 13. *Liaison degré d'emprisonnement d'air rayon maximal des pores.*

L'examen des graphiques représentant le degré d'emprisonnement d'air en fonction du rayon maximal des pores et des indices de mouillabilité pour les 12 échantillons montre l'existence d'une relation plausible seulement avec le rayon maximal des pores. Cependant, nous avons appliqué l'analyse de variance à deux régressions doubles faisant intervenir comme variables explicatives le rayon maximal des pores, puis l'un ou l'autre des indices de mouillabilité. Seul le rayon maximal de pores $r_m$ expliquait significativement ($P < 0{,}1$ p. 100) une partie de la variation du degré d'emprisonnement E :

$$E = 0{,}049\, r_m + 24{,}77$$

Compte tenu de la disposition des points expérimentaux sur le graphique (fig. 12), on a essayé un ajustement logarithmique qui s'est révélé plus adéquat : $P < 0{,}1$ p. 100 :

$$E = 24{,}58 \log r_m - 4{,}79$$

Cette régression explique 84 p. 100 de la variance de E.

Ainsi, pour la population de matériaux étudiés, l'emprisonnement d'air croît avec le diamètre maximal des pores. On tentera ultérieurement d'expliquer ce phénomène.

Le fait que nous n'ayons pu mettre en évidence une influence de la mouillabilité peut tenir au fait que la détermination de l'angle de raccordement vrai d'un matériau comportant des pores n'a pu être faite. Il se peut aussi que la gamme de variation de la mouillabilité soit insuffisante pour mettre en évidence son action ; en effet, pour les matériaux étudiés, l'angle de raccordement $\theta_i$ de la bulle immergée est tel que $0{,}72 < \cos \theta_i < 0{,}98$.

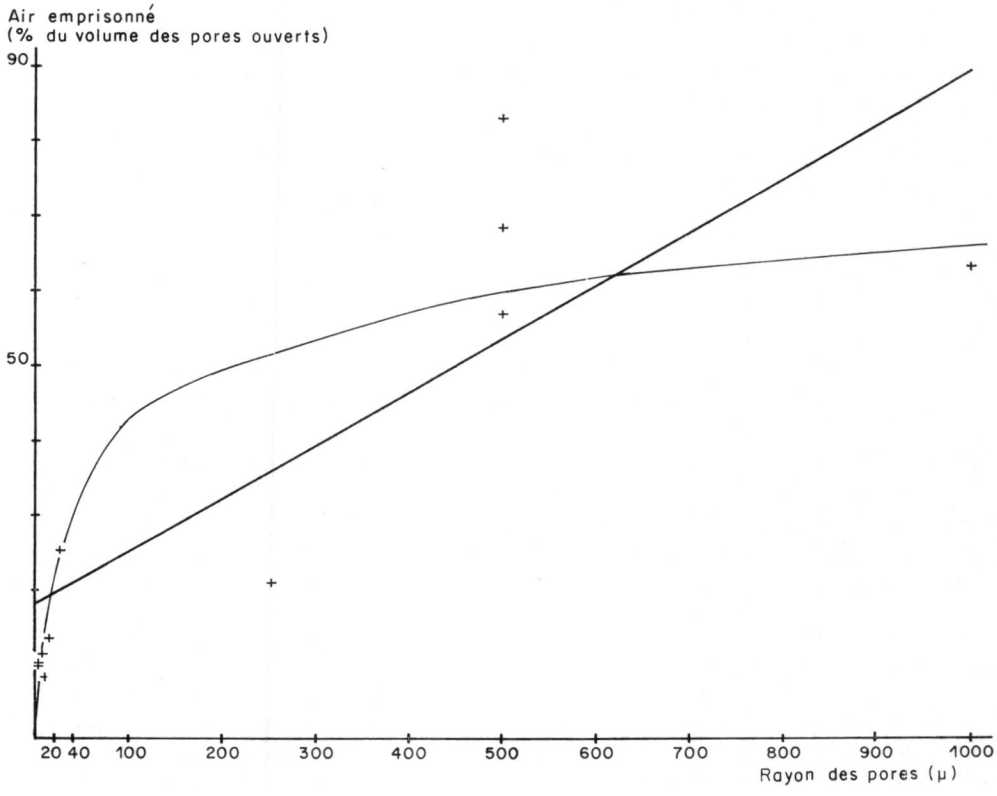



FIG. 12. — *Quantité d'air emprisonné et rayon maximal des pores*

3. 14. *Comparaison de la mesure du volume d'air emprisonné au moyen du pycnomètre et par dessiccation de l'échantillon.*

Une fois évalué le volume d'air emprisonné au moyen de pycnomètres, les échantillons en ont été retirés, puis séchés à l'étuve pour un dosage pondéral de leur humidité. En retranchant le volume d'eau ainsi obtenu du volume des pores ouverts, on obtient une évaluation de l'emprisonnement d'air. Pour comparer les deux façons de mesurer le volume d'air emprisonné, on a construit un graphique (fig. 13) ayant en ordonnée les valeurs mesurées au pycnomètre et en abscisse les valeurs obtenues à partir du dosage pondéral de l'eau. Pour les points représentatifs qui se placent, aux erreurs de mesures près, sur la première bissectrice, il n'y a pas de différence entre les deux mesures.

Sur les 12 échantillons étudiés autres que les billes de verre, 3 ont leurs points représentatifs au-dessus de la première bissectrice, 4 sont très proches de cette bissectrice et 5 au-dessous.

Lorsque les points représentatifs sont au-dessus de la première bissectrice, le dosage pondéral de l'eau sous-évalue le volume d'air emprisonné par rapport à la mesure au pycnomètre. On ne peut fournir d'explication satisfaisante de ce fait.

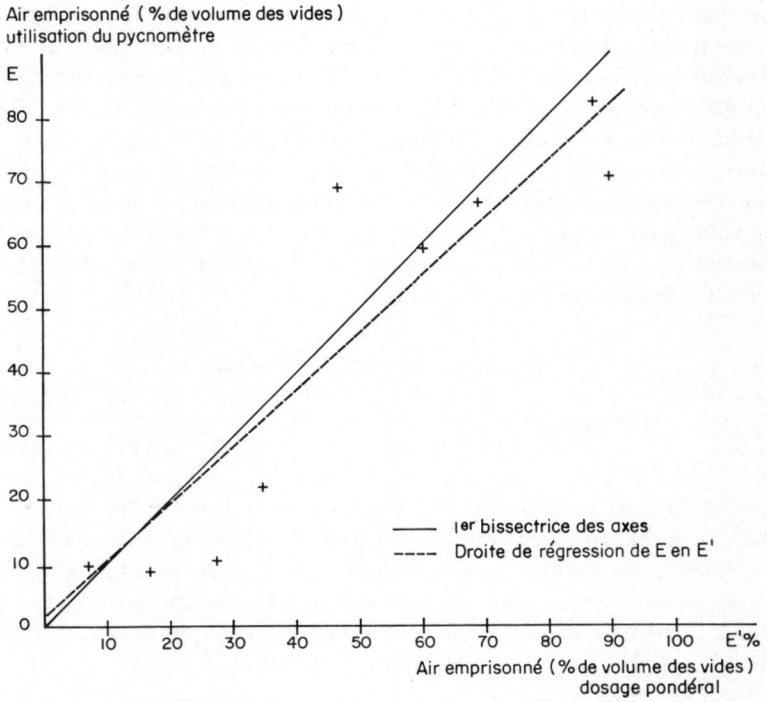



FIG. 13. — *Comparaison de diverses mesures d'emprisonnement d'air*

Les points situés au-dessous de cette bissectrice correspondent aux matériaux pour lesquels le dosage pondéral surévalue l'emprisonnement d'air par rapport à la mesure au pycnomètre. Comme le volume d'air se calcule en retirant le volume d'eau retenue du volume des vides, la différence peut provenir d'une évaluation par défaut du volume d'eau retenue ; on peut invoquer une perte d'eau au moment où l'échantillon est retiré du pycnomètre. Un examen plus approfondi montre que cette perte d'eau serait relativement indépendante du rayon maximal des pores, ce qui est en désaccord avec les constatations faites sur les massifs de billes de verre (section 2. 1). En effet, pour les matériaux à pores larges, certains points sont très au-dessous de la première bissectrice (pouzzolane, brique réfractaire), mais d'autres en sont très voisins (verre mousse, calcaire à milioles, pierre ponce) et un, l'andésite, est même au-dessus. Par contre, des éléments à pores relativement fins (porcelaine, verre fritté n° 4), pour lesquels les pertes d'eau devraient être minimales d'après les modèles de billes de verre, sont au-dessous de cette bissectrice.

Les différences de résultats entre les deux séries de mesures ne proviennent donc

pas uniquement du ressuyage spontané des échantillons à pores larges lorsqu'on les retire de l'eau.

Par ailleurs, les massifs de bille de verre ne se comportent pas de la même façon que les 12 matériaux étudiés ; pour ces derniers, la perte d'eau par ressuyage spontané est assez faible et indépendante du diamètre des pores. L'explication de cette différence de comportement est à rechercher dans la configuration de l'espace poral. Il y a vraisemblablement, pour certains des matériaux étudiés, des pores de grandes dimensions reliés entre eux par des pores de petites dimensions. Dans le cas des billes de verre, les pores présentent encore des variations de section (fig. 14), mais elles sont cependant moins marquées que dans le cas précédent. La perte d'eau par gravité peut alors être proportionnelle au diamètre maximal des pores (ou des billes). Pour les 12 matériaux étudiés, cette perte dépend des diamètres des petits pores mettant en communication les gros pores avec l'extérieur ; les gros pores ne se vident donc que lorsque l'énergie appliquée permet de vider les petits. Il y a là un effet homologue de celui qui a déjà été signalé pour l'injection de mercure. Dans le cas où des gros pores communiquent avec l'extérieur par de petits pores, ce qui se passe dans les gros pores est très lié aux phénomènes existant dans les petits.

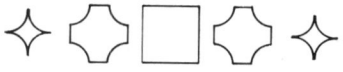


FIG. 14. — *Sections des espaces existant entre les billes de verre en arrangement cubique* (d'après GRATON et FRASER, 1935)

Les constatations précédentes montrent qu'il est difficile de choisir entre les deux façons de mesurer le volume d'air emprisonné. On peut simplement dire que les mesures sont correctes lorsqu'elles aboutissent à des valeurs sensiblement analogues. Cela est vrai en moyenne, puisqu'il existe une liaison étroite entre la mesure d'air emprisonné au pycnomètre E et la même mesure effectuée par dessiccation E' :

$$E = 0{,}896\ E' + 1{,}681 \qquad (P < 0{,}1\ \text{p. } 100)$$

La liaison de E avec E' explique 94,7 p. 100 de la variation de E.

### 3. 2. — *Essai d'interprétation des constatations expérimentales*

Nous venons de voir que les matériaux se différencient essentiellement par une expulsion plus ou moins complète de l'air initialement emprisonné. Par ailleurs, nous avons constaté expérimentalement une liaison négative entre le degré de remplissage de la porosité ouverte et le rayon maximal des pores. Pour interpréter les constatations précédentes nous utiliserons des modèles.

Un modèle est un schéma de la réalité qui doit être à la fois suffisamment simple pour se prêter à l'étude (expérimentale ou mathématique) du phénomène et représentatif de la réalité, ou du moins d'un ou plusieurs de ses aspects. Ces modèles sont ici des schémas théoriques et des tubes en verre de forme particulière.

#### 3. 21. *Schémas théoriques.*

Nous étudierons successivement la phase initiale d'emprisonnement d'air et la phase d'expulsion. Cette distinction, nette pour certains matériaux (les premières bulles d'air sortent de l'échantillon quelques secondes après immersion), est certaine-

ment beaucoup moins stricte pour d'autres pour lesquels les deux phases se recouvrent partiellement. Il n'en demeure pas moins que, même dans ce dernier cas, il est licite de continuer à distinguer en gros ces deux stades, au cours de l'humectation du matériau.

3. 211. *Phase d'emprisonnement d'air initiale.*

Au cours de cette phase, des bulles d'air apparaissent dans le milieu poreux en train de s'humecter.

Beaucoup de mécanismes d'occlusion d'air résultent de la manifestation d'effets capillaires dans des espaces lacunaires ayant une configuration particulière. Certains de ces mécanimes interviennent en dehors de toute submersion, lorsqu'on laisse l'échan-

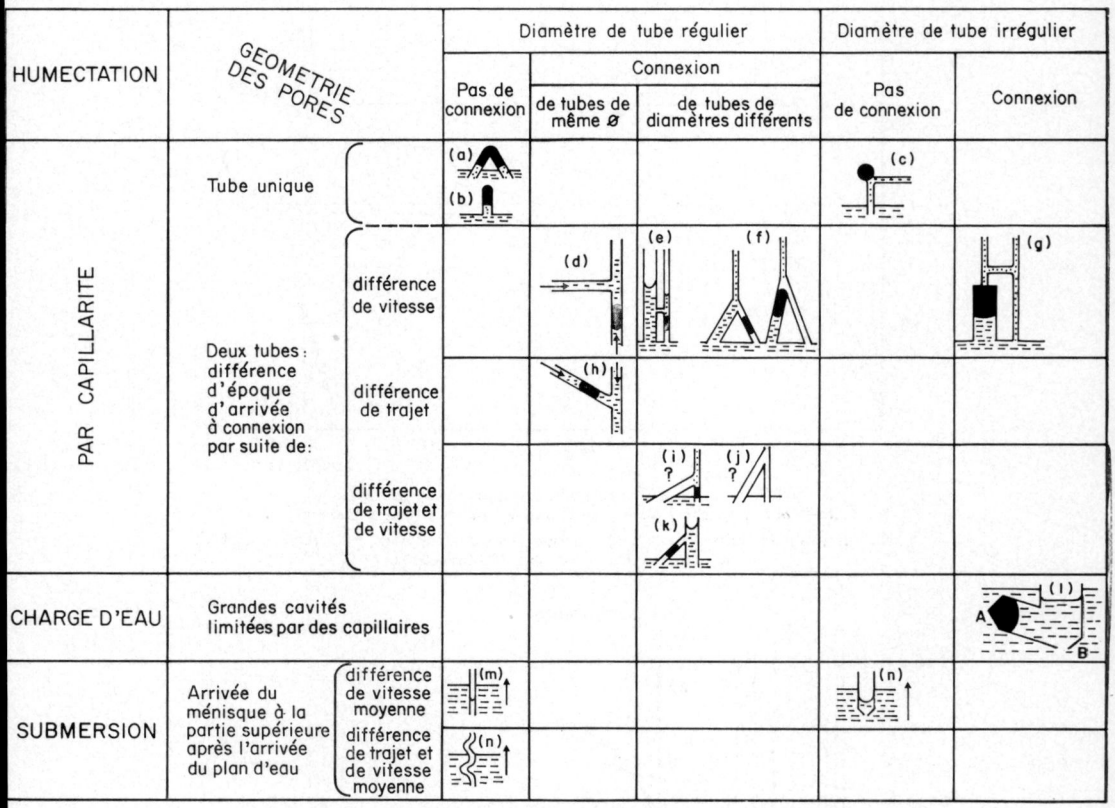



FIG. 15. — *Mécanismes d'emprisonnement initial d'air*

tillon s'humecter par une de ses faces. Nous donnons une énumération non limitative de ces processus expliqués sur la figure commentée (fig. 15) représentant des tubes de mouillabilité uniforme.

Rappelons d'abord quelques mécanismes existant dans les pores isolés de forme particulière :

— pénétration d'eau par les deux extrémités d'un canalicule aboutissant sur une même face du solide (fig. 15 *a*).

— arrêt de la pénétration de l'eau dans un cul-de-sac (fig. 15 *b*),
— emprisonnement d'air dans un tube de diamètre irrégulier de forme spéciale (fig. 15 *c*).

Comme le volume des pores précédents représente certainement une fraction assez faible de la porosité ouverte, l'existence de communications entre les pores est vraisemblablement une cause beaucoup plus fréquente d'emprisonnement d'air initial. Celui-ci provient du fait que les ménisques ne parviennent pas en même temps à la connexion entre les tubes. Les différences de

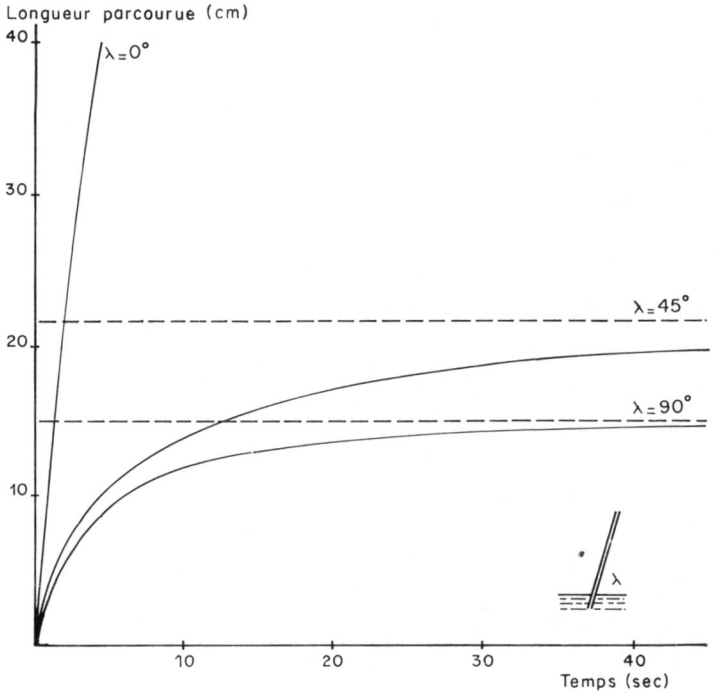



FIG. 16. — *Trajet parcouru par le ménisque dans des capillaires de même diamètre inclinés sur l'horizontale*
Rayon des capillaires : 0,01 cm ; angle de raccordement eau-verre : nul
λ : angle entre le tube et l'horizontale

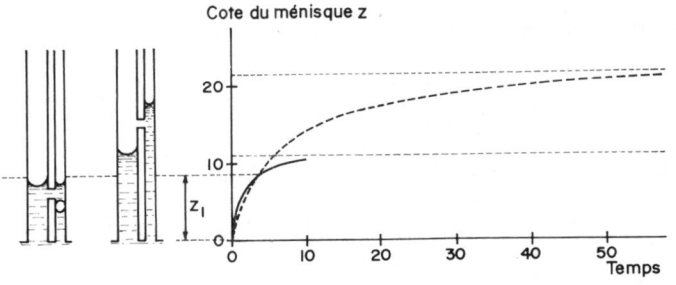



FIG. 17. — *Trajet parcouru par les ménisques dans des capillaires de diamètres différents*

trajet parcouru tiennent entre autres à des différences de vitesse provenant de l'inclinaison différente de tubes de même diamètre par rapport à l'horizontale ; la vitesse dans le tube le plus incliné est toujours supérieure à celle qui existe dans le tube le moins incliné (fig. 16) : mécanisme de la figure 15 *d* (Annexe 2).

La différence des rayons entre deux pores provoque des variations de vitesses compliquées par les différences d'ascension maximales (fig. 15 *e*, 17). Pour qu'il y ait emprisonnement d'air, la cote du

pore mettant en communication les deux tubes doit être inférieure à la cote $z_1$ commune aux deux ménisques. En effet, au-delà de cette cote, quoique le ménisque du pore étroit soit au-dessus de celui du pore large, l'eau ne peut se déverser par succion du pore étroit vers le pore large.

Il peut cependant se produire une bulle dans le tube le plus large (fig. 15 *f*), si le point de jonction entre capillaires est situé suffisamment haut et a une forme telle que le ménisque continue à avancer dans le tube étroit après être parvenu à y pénétrer. Des combinaisons entre les différences de diamètre des tubes et le rétrécissement d'un des tubes peuvent entraîner la formation d'une bulle (fig. 15 *g*).

Lorsque les tubes sont dans un plan horizontal, les ménisques n'arrivent pas ensemble au point de jonction des tubes parce que les distances parcourues pour y arriver ne sont pas les mêmes (fig. 15 *h*). On peut avoir enfin des combinaisons de différences de trajet et de vitesse (fig. 15 *j-k*).

Lorsque des cavités de grandes dimensions (où les actions capillaires sont nulles) sont limitées par des orifices de dimensions capillaires (fig. 15 *l*), l'humectation due à la capillarité est très faible, puisque la pression capillaire s'annule dès que le ménisque est parvenu dans la cavité. Le remplissage ne peut s'effectuer alors que sous l'action d'une charge d'eau. La force de freinage due à la viscosisé étant importante au niveau des orifices étroits, le tube terminé par l'orifice le plus petit se comporte comme un pore en doigt de gant. Il y a en quelque sorte induction d'un pore en doigt de gant.

Une cause importante d'emprisonnement d'air est la submersion de l'échantillon, qui provoque la formation d'un autre ménisque à la partie supérieure de pores non encore remplis par le bas (fig. 15 *m, n, o*). La différence entre la vitesse d'élévation du plan d'eau autour de l'échantillon et la vitesse de déplacement des ménisques dans les pores (dérivée du quotient de la cote du ménisque par le temps) est déterminante : l'emprisonnement nul pour une différence de vitesse nulle croît avec la différence de vitesse et donc avec la rapidité de la submersion et la lenteur de progression verticale de l'eau dans les pores de l'échantillon (faible débit d'orifice aboutissant dans des cavités — effet de la tortuosité).

Les exemples précédents montrent l'importance de la configuration de l'espace poral sur l'occlusion de bulles d'air, qu'il s'agisse des connexions entre les pores ou de variations importantes de diamètre dans un même pore.

Lorsque la porosité est constituée de pores fins et relativement réguliers, l'ensemble de l'échantillon a tendance à s'humecter rapidement. Ceci réduit donc les risques d'emprisonnement par submersion (cf. fig. 15 *m, n, o*).

La non mouillabilité ($\pi/2 < \theta < \pi$) supprime tout remplissage par l'eau. Une diminution uniforme de la mouillabilité ($o < \theta < \pi/2$) réduit la vitesse de pénétration de l'eau par le jeu de l'angle $\theta$ de raccordement. Ceci ne modifie pas les phénomènes d'emprisonnement d'air intervenant lorsque l'échantillon s'humecte par une face seulement, puisque les vitesses sont réduites partout de la même façon. Par contre, au moment de la submersion de l'échantillon, un volume plus faible des pores sera occupé par l'eau qui pénètre plus lentement ; on peut donc s'attendre dans ce cas à une augmentation de la quantité d'air occluse initialement.

De plus, des différences de mouillabilité d'un tube à l'autre provoquent des différences de vitesse des ménisques qui favorisent l'emprisonnement d'air.

On peut tenter d'évaluer la quantité d'air emprisonné dans la phase initiale. Pour cela, on étudie l'occlusion d'air dans un doublet de pores en considérant un cas particulier simple : doublet de pores horizontaux pour lesquels les effets de gravité sont nuls, la mouillabilité des parois étant uniforme.

Établissons d'abord l'*équation du déplacement du ménisque* à l'interface air eau. Selon BARRER (1958), la vitesse de déplacement de ce ménisque est donnée par l'équation traduisant l'équilibre entre les forces motrices (hydrostatiques et de tension superficielles) et les forces résistantes (viscosité), en négligeant les effets d'inertie (fig. 18). Force hydrostatique : $\pi r^2 \Delta p_h$ ($\Delta p_h$ = différence de pression appliquée entre les deux extrémités du tube).

Force due à la tension superficielle $= 2\ \pi r\ T_{EA} \cos \theta$. ($T_{EA}$ = tension interfaciale eau air, $\theta$ angle de raccordement).

Force due à la viscosité de l'eau $n$ : $8\,\pi\,n \cdot x \cdot \dfrac{dx}{dt}$. On néglige les effets de viscosité de l'air.

L'équation s'écrit : $\pi r^2\,\Delta p_h + 2\pi r T_{EA} \cos\theta = 8\pi n \cdot x \cdot dx/dt$

Après intégration : $x^2 = \dfrac{1}{4n}\,(r^2\,\Delta p_h + 2\,r T_{EA} \cos\theta) \cdot t$

Considérons maintenant, avec Rose et Witherspoon (1956), un doublet de pores (fig. 19), c'est-à-dire 2 pores rectilignes cylindriques de même longueur $l$, mais de rayons différents $r_1$ et $r_2$ ($r_2 > r_1$).

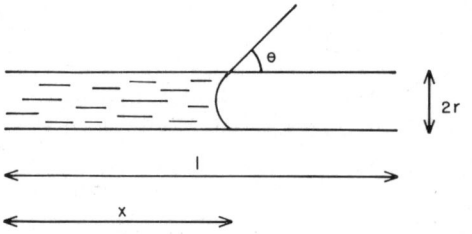



Fig. 18. — *Déplacement du ménisque dans un tube capillaire*

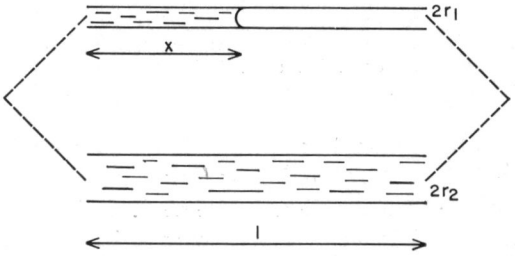



Fig. 19. — *Doublet de pores*

L'eau, qui pénètre dans les pores au même instant, avance plus vite dans le tube le plus large, comme l'indique l'équation précédente. Ce pore est rempli au bout du temps $t$, obtenu en remplaçant $x$ par $l$ dans l'équation déjà citée :

$$t = \frac{4\,nl^2}{r_2^2\,(\Delta p_h + 2\,T_{EA} \cos\theta/r_2)}$$

Au même temps $t$, le ménisque a parcouru la longueur $x$ dans le petit tube :

$$t = \frac{4nx^2}{r_1^2\,(\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r_1)}$$

L'expression

$$t = \frac{4nx^2}{r_1^2\,(\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r_1)} = \frac{4nl^2}{r_2^2\,(\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r_2)}$$

donne : $x = l\,\dfrac{r_1}{r_2}\left(\dfrac{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r^1}{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r^2}\right)^{\frac{1}{2}}$

Le volume d'air emprisonné à l'instant $t$ est :

$$\pi r_1^2 (l - x) = \pi r_1^2 l \left[ 1 - \frac{r_1}{r_2} \left( \frac{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r_1}{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

En rapportant ce volume à celui du doublet, on obtient l'expression E :

$$E = \frac{\pi r_1^2 (l - x)}{\pi r_1^2 l + \pi r_2^2 l} = \frac{r_1^2 \left[ 1 - \frac{r_1}{r_2} \left( \frac{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r_1}{\Delta p_h = 2T_{EA} \cos \theta / r_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{r_1^2 + r_2^2}$$

Cette expression se simplifie en posant :

$R = r_1/r_2$, rapport du rayon du capillaire étroit à celui du capillaire large

$F = \Delta p_h/(2T_{EA} \cos \theta/r_1)$, rapport de la différence de pression appliquée à la pression capillaire dans le tube étroit.

$$E = \frac{R^2}{1 + R^2} \left[ 1 - R \left( \frac{1 + F}{F + R} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

L'expression E, nulle pour $R = 0$ ($r_1 = 0$, pas de doublet), passe par un maximum puis s'annule à nouveau pour $R = 1$ ($r_1 = r_2$, doublet de pores de même diamètre) (fig. 20). L'emprisonnement est ainsi maximum pour une certaine valeur du rapport

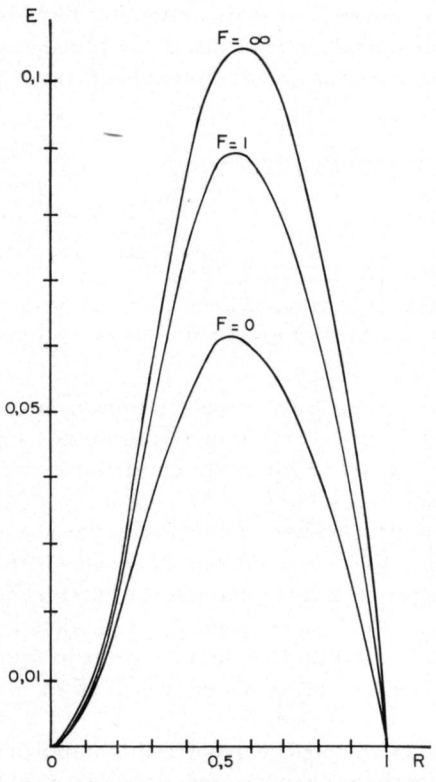



FIG. 20. — *Quantité d'air emprisonnée dans un doublet de pores en fonction du rapport des rayons R*

des deux rayons : en effet, la quantité d'air emprisonnée dans le pore le plus étroit tend à augmenter avec le rayon de ce pore, mais ce faisant, la vitesse du ménisque dans ce pore se rapproche de celle du pore large, ce qui diminue la quantité d'air emprisonnée ; on explique bien ainsi l'existence d'un optimum de R.

L'emprisonnement d'air croît avec F, comme le montre le signe de $dE/dF = -\frac{1}{2} \cdot \frac{R^3 (R - 1) (1 + F)^{-\frac{1}{2}}}{(1 + R^2) (R + F)^{3/2}}$ qui est toujours positif, puisque $0 < R < 1$ ; E, qui prend la valeur $\frac{R^2}{1 + R^2} (1 - \sqrt{R})$ pour $F = 0$, tend vers l'asymptote $\frac{R^2}{1 + R^2} (1 - R)$ pour $F = + \infty$. La quantité d'air emprisonnée augmente donc avec le rapport de la différence de pression existant entre les deux extrémités du doublet à la pression capillaire dans le pore étroit. Sur la figure 20, on a représenté les relations $E = f(R)$ pour $F = 0$, $F = 1$ et $F = + \infty$.

Rappelons que la quantité d'air, emprisonnée lors de la phase initiale, constitue le maximum de la quantité emprisonnée définitivement, puisque l'expulsion peut intervenir par la suite.

3. 212. *Phase d'expulsion d'air.*

Examinons d'abord le devenir de l'air emprisonné dans le doublet. Pour cela comparons les pressions exercées aux deux extrémités de la bulle tout de suite après sa formation, c'est-à-dire après que le ménisque du tube large soit parvenu au point de jonction (fig. 21). Les pressions sont comptées par rapport à la pression atmosphérique.

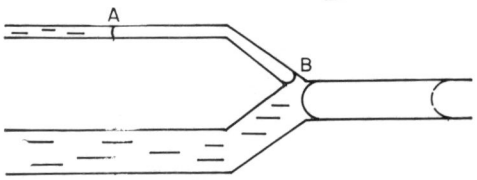



FIG. 21. — *Emprisonnement d'air dans un doublet de pores*

Lorsque l'imbibition se fait sous la seule action de la capillarité, la pression en A est $p_1 = 2T_{EA} \cos \theta / r_1$. En B s'exerce une pression de sens opposée $p_1$, diminuée de la pression $p_2 = 2T_{EA} \cos \theta / r_2$ qui existe en arrière du ménisque avançant dans le tube commun du doublet. Comme $p_1 > p_1 - p_2$ il n'y a pas équilibre et la bulle se déplace vers B où elle est progressivement entraînée par le courant d'eau. Le volume de la bulle diminuera tant qu'il y aura un ménisque dans le tube commun du doublet.

Si une différence de pression $\Delta p_h$ est appliquée entre les deux extrémités du tube, les pressions sont en A : $\Delta p_h + p_1$ et en B : $p_1 - p_2$. Comme $\Delta p_h + p_1 > p_1 - p_2$, l'air sera encore expulsé en totalité. Il en sera de même lorsque il n'y a plus de ménisque dans le tube commun, les pressions en A et B étant respectivement $\Delta p_h + p_1$ et $p_1$.

Ainsi, pour un doublet de pores de mouillabilité uniforme, dans lequel aucun des tubes ne présente un rétrécissement, l'expulsion de l'air est complète, à moins que le mouvement de l'eau ne s'arrête. Cet arrêt peut être dû, dans le cas d'imbibition par

capillarité, au fait que les ménisques sont parvenus à l'extrémité du système poreux ; localement aussi, la circulation de l'eau peut être arrêtée dans un doublet parce qu'un emprisonnement d'air se produit en aval dans le gros pore. Lorsque la cause de la circulation est une différence de pression, sa disparition entraîne l'arrêt du mouvement de l'eau ; un certain degré de remplissage (cas d'échantillon immergé) a le même résultat.

Lorsque l'eau circule dans un corps poreux contenant des bulles d'air, il existe un autre mécanisme d'expulsion progressive de l'air. L'air sous pression dans la bulle d'air se solubilise partiellement dans l'eau ; cet air diffuse vers une région de l'espace poral où, à cause de la circulation de l'eau, qui déplace constamment l'équilibre, la teneur en air de l'eau est plus faible ; l'air dissous est alors entraîné avec l'eau. Ce mécanisme qui met en jeu successivement la diffusion sur une petite distance, puis le transfert de l'air dans l'eau en mouvement, permet d'évacuer des quantités d'air nettement supérieures à ce qu'on pourrait attendre de la seule diffusion de l'air de la bulle vers l'atmosphère dans l'eau immobile.

Même lorsque l'eau ne circule pas dans le corps poreux, les bulles d'air peuvent encore s'y déplacer. Le mouvement se fait de façon que l'énergie libre du système bulle eau devienne minimum : en effet, le déplacement de la bulle peut modifier les interfaces air eau, et air paroi, ce dernier changement ayant pour contrepartie un changement de l'interface paroi eau. Si l'analyse de ce déplacement est assez ardue, on peut, par contre, résoudre facilement le problème des conditions d'équilibre. Nous allons donc étudier la statique de la bulle d'air dans des tubes capillaires immergés dans l'eau.

Considérons d'abord un tube isodiamétrique cylindrique placé horizontalement. Il existe au niveau des ménisques limitant la bulle une pression qui est la somme de la pression capillaire et de la pression hydrostatique $z$, $z$ étant la cote du tube par rapport au plan d'eau libre (fig. 22 *a*). Les pressions résultantes $p + z$ étant identiques à chaque extrémité de la bulle, celle-ci est en équilibre. Plaçons le tube verticalement (fig. 22 *b*). La pression en A est $z_A + p$ et en B $z_B + p$. Comme $z_B > z_A$, $z_B + p > z_A + p$. La bulle est poussée vers le haut jusqu'à expulsion complète. Donc, on ne peut avoir emprisonnement d'air à l'intérieur d'un capillaire isodiamétrique que dans le cas très particulier où ce capillaire est rigoureusement horizontal.

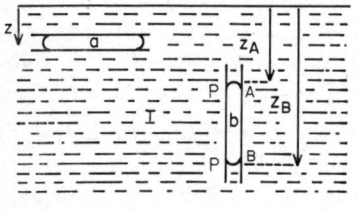



FIG. 22. — *Bulle d'air dans un capillaire isodiamétrique*

Ceci nous amène à considérer un capillaire cylindrique de rayon $r$, effilé à une extrémité de façon à avoir un orifice de rayon $r' < r$. D'après la loi de Laplace, les pressions capillaires aux extrémités seront respectivement $p'$ et $p$ telles que $p' > p$.

Plaçons ce tube horizontalement (fig. 23 *a*). Lorsque les ménisques ont la position de cette figure, la pression capillaire est plus forte en A qu'en B ; le ménisque A

va se déplacer vers B pour parvenir dans la section de rayon $r$ ; les pressions capillaires sont alors égales en A et en B et l'équilibre est atteint.

Mettons le tube dans la position verticale, en distinguant deux cas suivant que l'extrémité la plus fine est en haut ou en bas.

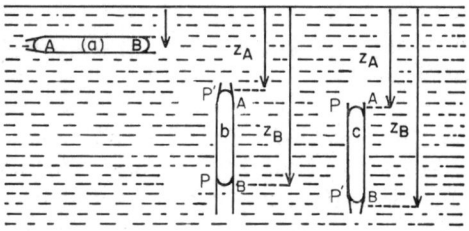



FIG. 23. — *Bulle d'air dans un capillaire ayant une de ses extrémités effilée*

*a*) L'extrémité la plus fine est en haut (fig. 23 *b*). Supposons la bulle dans la partie centrale de section uniforme. Les pressions capillaires étant identiques aux deux extrémités de la bulle, celle-ci se déplace vers le haut sous l'influence des différences de pression hydrostatique $z_A$ et $z_B$. Lorsque l'extrémité A de la bulle parvient dans la partie effilée, on a :

$$\begin{array}{l} \text{en A} : z_A + p' \\ \text{en B} : z_B + p \end{array} \text{ avec } \begin{cases} p' < p \\ z_A < z_B \end{cases}$$

On aura équilibre si $z_A + p' = z_B + p$ ou $z_B - z_A = p' - p$.

Comme on peut toujours trouver une valeur de $z_B - z_A$ égale à $p' - p$, on parviendra à un équilibre, qui pourra être réalisé après expulsion d'une certaine quantité d'air. En aucun cas, il n'y aura expulsion totale de l'air.

*b*) L'extrémité la plus fine est en bas (fig. 23 *c*). Dans la position du schéma :

$$\begin{array}{l} \text{en A } z_A + p \\ \text{en B } z_B + p' \end{array} \qquad \text{avec } \begin{cases} z_B > z_A \\ p' > p \end{cases}$$

$z_B + p' > z_A + p$, la bulle se déplace vers le haut et la pression en B va devenir $p$. L'inégalité se réduit à $z_B > z_A$. La pression en B restant supérieure à la pression en A, la bulle se déplace vers le haut jusqu'à son expulsion complète du tube.

La discussion de l'équilibre peut se faire d'une façon plus synthétique en posant :

$p_{bas} - p_{haut} = \Delta p$, différence de pression capillaire entre le ménisque haut et le ménisque bas ;

$z_{bas} - z_{haut} = \Delta z$, différence de pression hydrostatique entre le bas et le haut de la bulle, et en examinant le signe de l'expression $\Delta z - \Delta p$. Par exemple dans le cas du tube qui a une extrémité effilée en haut, la condition d'équilibre $z_A + p' = z_B + p$ s'écrit avec la convention précédente $\Delta z - \Delta p = 0$. Les résultats sont rassemblés ci-dessous :

— tube isodiamétrique

horizontal *équilibre* $\Delta z - \Delta p = 0$
puisque $\Delta z = \Delta p = 0$

vertical expulsion $\Delta z - \Delta p > 0$
puisque $\Delta p = 0$ et $\Delta z$ toujours $> 0$

— tube à extrémité effilée

horizontal *équilibre* $\Delta z - \Delta p = 0$
puisque $\Delta z = \Delta p = 0$

vertical ∅ pointe effilée en bas : expulsion $\Delta z - \Delta p > 0$
puisque $\Delta p < 0$ comme
$p$ haut $- p$ bas $< 0$

∅ pointe effilée en haut : $\Delta p > 0$ puisque $p$ haut $- p$ bas $> 0$
expulsion d'air par le haut tant que $| \Delta z | > | \Delta p$

$\Delta p$ étant constant, on parvient à un *équilibre final* par diminution de $\Delta z$, lorsque $\Delta z - \Delta p = 0$.

Si on excepte le cas particulier des tubes horizontaux, on n'arrive à un équilibre de la bulle d'air et donc à un emprisonnement d'air que dans le cas d'un tube à extrémité effilée, si celle-ci est placée en position haute. L'irrégularité du diamètre des capillaires est donc une cause de diminution de l'expulsion de l'air, et favorise donc ainsi l'emprisonnement d'air définitif.

Examinons quelles peuvent être les conséquences d'une diminution uniforme de la mouillabilité sur la phase d'expulsion. Nous considérerons seulement le cas où il existe une certaine mouillabilité ($0 < \theta < \pi/2$), le remplissage étant évidemment théoriquement nul dans le cas de corps non mouillables ($\theta > \pi/2$). Dans le cas du tube vertical à extrémité effilée en haut, on a expulsion d'air par le haut jusqu'à ce que $\Delta z - \Delta p = 0$. La diminution de la mouillabilité se traduit par une modification de la formule d'équilibre qui s'écrit $\Delta z - \Delta p \cos \theta = 0$, en notant $\Delta p$ la différence de pression capillaire qui existerait si la mouillabilité étant parfaite ; de plus ici $0 < \cos \theta < 1$. En diminuant le terme pression capillaire, on augmente la différence entre les termes pression hydrostatique et pression capillaire ; ce faisant, il faudra une plus grande diminution de $\Delta z$ pour équilibrer $\Delta p \cos \theta$ que $\Delta p$, il y aura donc expulsion d'une plus grande quantité d'air avant que l'équilibre soit atteint. Une mauvaise mouillabilité provoquerait donc une expulsion d'air plus importante. Par contre, on peut penser que les variations de mouillabilité d'un point à un autre du capillaire augmentent la quantité d'air emprisonné.

L'étude de la statique de la bulle d'air a montré que l'expulsion n'est pas complète si une extrémité du tube est effilée. Ceci nous amène à compliquer le modèle du doublet de pores en introduisant un rétrécissement de rayon $r_a$ à l'endroit où le petit tube rejoint le gros (fig. 24). Le volume d'air emprisonné dans la phase initiale n'est pas modifié par cette complication du modèle si le rétrécissement n'est pas suffisamment marqué pour empêcher le libre écoulement de l'air. D'après MOREL-SEYTOUX (1959), on a équilibre si $p_1 = p_a - p_2$ (fig. 24 *a*) avec $p_a = \dfrac{2T_{EA} \cos \theta}{r_a}$

$$p_a = p_1 + p_2 \quad 1/r_a = 1/r_1 + 1/r_2$$

Avec une différence de pression imposée $\Delta p_h$ (fig. 24 *b*) :

$$p_1 + \Delta p_h = p_a - p_2 \qquad p_a = p_1 + p_2 + \Delta p_h$$
$$1/r_a = 1/r_1 + 1/r_2 + \Delta p_h / 2T_{EA} \cos \theta$$

Dans le cas de la disparition du ménisque dans le gros tube ($p_2 = 0$), on a encore un équilibre possible (fig. 24 *c*), la valeur de $p_a$ étant inférieure à celle de l'équilibre précédent, le rayon du rétrécissement doit être plus grand.

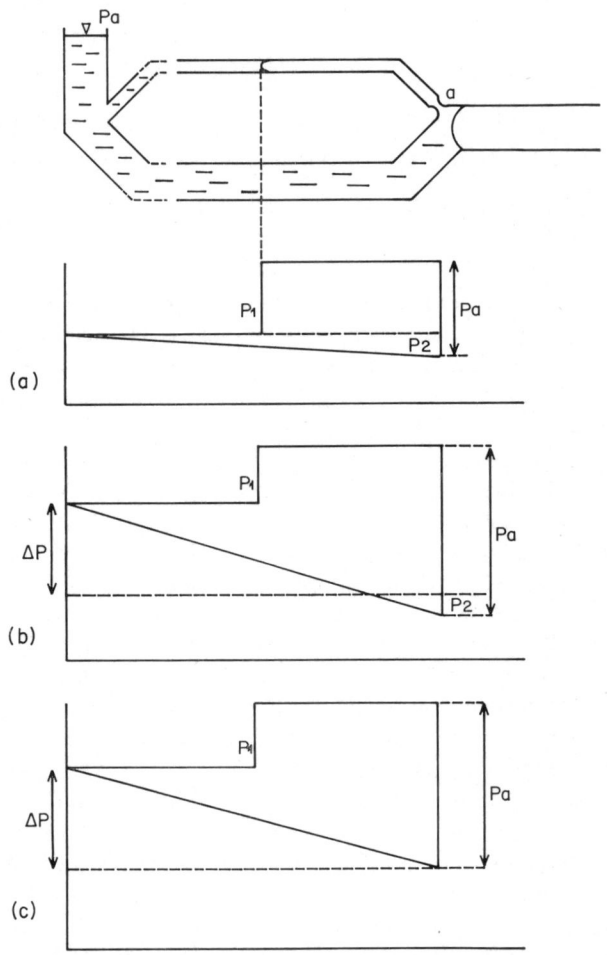



FIG. 24. — *Conditions d'expulsion de l'air dans un doublet de pores, l'un de ses pores présentant un rétrécissement*

*a* : inhibition sous l'effet de la capillarité
*b* : inhibition sous l'effet de la capillarité et d'une différence de pression
*c* : cas où le ménisque a disparu dans le tube large

On a d'autant moins de chances d'emprisonner définitivement de l'air que la différence de pression appliquée est plus grande. Rappelons qu'un gradient élevé favorise par contre l'emprisonnement initial d'air, ce qui montre bien la complexité du problème.

Il est important de noter que, dans le cas du doublet avec un rétrécissement, il y a un emprisonnement définitif d'air, ce qui n'était pas le cas lorsque les pores étaient réguliers, du moins si le mouvement de l'eau durait assez longtemps.

Il peut y avoir encore équilibre de la bulle d'air si le rétrécissement du capillaire est remplacé par une diminution locale de mouillabilité ($\theta$ devient $\theta'$ tel que $\theta' > \theta$) :

$$2T_{EA} \cos \theta'/r_1 = 2T_{EA} \cos \theta/r_1 + 2T_{EA} \cos \theta/r_2 + \Delta p_h.$$

Il en est de même si au même endroit le ménisque s'accroche à la paroi, ce qui entraîne une augmentation de courbure (GRÉMY et PAGÈS, 1966).

Une diminution uniforme de mouillabiité est sans influence sur l'emprisonnement d'air lorsque les effets capillaires interviennent seuls, puisque la relation entre $r_a$ $r_1$ et $r_2$ est indépendante de cos $\theta$. Par contre, avec un gradient de pression, $r_a$ diminue en même temps que la mouillabilité. Le rétrécissement doit être d'autant plus marqué que la mouillabilité est plus faible.

3. 22. *Études sur modèles en verre.*

Nous avons vérifié sur des modèles en verre la réalité des mécanismes qui ont été imaginés précédemment.

Ces modèles sont destinés à schématiser les pores en communication et leurs irrégularités de diamètre (fig. 25). Comme il s'agit de suivre visuellement le remplissage du modèle, les diamètres des tubes capillaires sont assez grands. Par ailleurs, ces modèles qui ne permettent pas de calculer un coefficient permettant la transposition des résultats au milieu naturel, ont uniquement une valeur analogique.

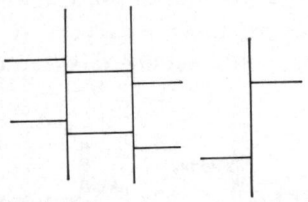


FIG. 25. — *Modèles en verre*

Nous avons d'abord vérifié, sur des tubes de verre de diamètre intérieur 100 et 500 $\mu$ immergés dans l'eau, la validité des considérations invoquées pour rendre compte de différences dans l'expulsion de l'air : l'emprisonnement d'air nécessite soit une humectation du tube dans la position horizontale, soit l'existence de différences de diamètre dans le tube capillaire placé verticalement avec le rétrécissement en haut.

Les modèles avec connexions ont été réalisés de façon à avoir, pour certains un diamètre uniforme des capillaires (sauf toutefois aux points de soudure), pour les autres des variations de diamètre.

— *Modèles à capillaires sensiblement isodiamétriques.*

L'immersion brutale des tubes de 1 mm provoque en général un faible emprisonnement d'air sous forme de bulles assez petites, souvent localisées au point de raccordement de 2 tubes, où, par construction, il y a une augmentation importante du diamètre intérieur. Une imbibition lente de type particulier (fig. 26) supprime le plus souvent cet emprisonnement d'air : on humecte les 2 tubes par capillarité, de

façon que les ménisques arrivent ensemble dans l'élargissement correspondant à la connexion des tubes, on élève ensuite le niveau de l'eau et le ménisque monte en chassant l'air au-dessus de lui. Au cours d'une imbibition sans précaution, au contraire, les ménisques n'arrivent pas simultanément au point de connexion, d'où emprisonnement d'air. Si on laisse pénétrer l'eau par un seul orifice, les tubes se remplis-

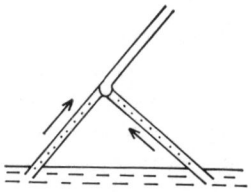


FIG. 26. — *Imbibition de type particulier*

sent de proche en proche sans qu'il y ait emprisonnement d'air, sauf toutefois aux endroits où, du fait de l'anastomose des tubes, un ménisque arrive par chacune des extrémités d'une section de tube.

— *Modèles à capillaires non isodiamétriques.*

Les tubes de 1 mm précédents ont été modifiés en effilant leurs extrémités sauf une. Lorsqu'on immerge le tube avec *l'extrémité non effilée en haut*, on a un emprisonnement d'air définitif beaucoup moins important que si on la place *en bas*. Dans le cas du tube le plus compliqué, les mêmes phénomènes se produisent et de plus l'emprisonnement d'air souvent localisé au voisinage des connexions est relativement beaucoup moindre dans les tubes adjacents au tube vertical non effilé en haut (fig. 27). Ces observations confirment que, dans un modèle constitué par un réseau

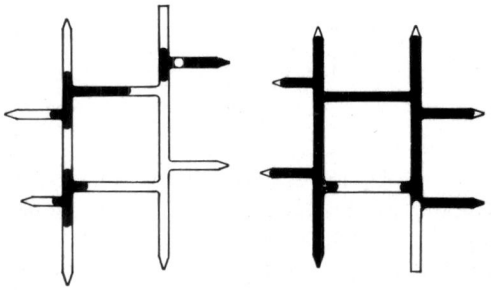


FIG. 27. — *Emprisonnement d'air dans un modèle en verre*
L'air est figuré en noir
*à gauche* : grand orifice en haut
*à droite* : grand orifice en bas

de tubes, les mêmes facteurs interviennent que dans les tubes simples, puisqu'un orifice relativement grand placé en position haute favorise toujours l'expulsion de l'air. La comparaison, dans le groupe des tubes interconnectés, de ceux à diamètre régulier et irrégulier, montre que l'occlusion d'air définitive est plus importante lorsqu'il y a irrégularité des diamètres.

On a utilisé aussi des tubes complexes de diamètre 3 mm qui ont eu leurs extré-

mités effilées, ce qui augmente les différences de diamètre des tubes. Si l'humectation est brutale, l'emprisonnement d'air est important et affecte environ la moitié du volume Selon la forme des tubes et leur disposition par rapport à l'horizontale, il peut y avoir expulsion d'une partie de l'air par les orifices supérieurs. Les mécanismes mis en jeu, tant pour l'occlusion initiale que pour l'expulsion partielle d'air, sont analogues à ceux signalés pour les tubes simples de diamètre irrégulier.

Une imbibition lente réduit considérablement l'emprisonnement d'air, en grande partie en permettant à l'air de s'échapper par les orifices supérieurs non encore submergés. Toutefois, même en procédant avec précaution, on ne parvient pas à remplir complètement les tubes. Il y a souvent des occlusions d'air dans les diverticules qui se comportent comme des pores en doigts de gant, du fait de la lenteur de pénétration de l'eau par une des extrémités (fig. 28). On réalise ainsi expérimentalement le « cul-de-sac induit » dont on avait évoqué la possibilité théorique.

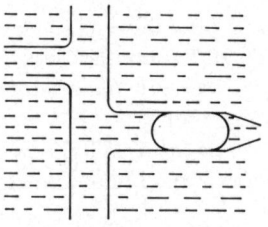


FIG. 28. — *Cul-de-sac induit dans un pore*

Les modèles constitués de tubes complexes ont confirmé la constatation déjà faite sur les tubes simples : rôle positif de l'irrégularité de la configuration des pores sur l'emprisonnement d'air. Ces modèles ont permis également de confirmer le rôle spécifique des connexions entre les pores sur l'emprisonnement d'air.

3. 23. *Conclusion sur l'emprisonnement d'air.*

Nous allons tenter une explication synthétique des différences de comportement des milieux poreux du point de vue de l'emprisonnement d'air, en nous appuyant sur les résultats des études de schémas théoriques et modèles.

L'emprisonnement d'air définitif résulte de la succession de deux processus, l'emprisonnement d'air initial et l'expulsion plus ou moins complète de l'air emprisonné au cours de la phase précédente.

*L'emprisonnement initial d'air* peut se produire, même lorsqu'on humecte un corps poreux avec précaution. Ceci implique l'existence de communications entre les pores, communications existant dans les milieux poreux naturels ; si les ménisques de deux capillaires n'arrivent pas ensemble à leur point de jonction, il y aura dans un des pores deux ménisques se déplaçant en sens inverse, isolant ainsi une bulle d'air. Cette différence d'arrivée des ménisques au point de jonction des tubes se produit dans des situations très variées : différence de rayon des pores, de tortuosité, de position par rapport à la verticale... L'irrégularité de la géométrie des pores et de leurs positions relatives joue un rôle essentiel.

Lorsqu'on applique une différence de pression hydrostatique entre les deux faces de l'élément poreux, il semble (d'après l'étude du doublet de pores) que la quantité initiale d'air emprisonné augmente avec cette différence de pression.

Au terme du processus que nous venons de décrire, il existe dans le corps poreux une certaine quantité d'air. Ensuite cette quantité d'air peut diminuer ; à partir de ce moment on entre dans la phase d'expulsion.

*L'expulsion d'air* peut se faire à la suite de la mise en jeu de plusieurs mécanismes. Certains se produisent lorsqu'il y a circulation de l'eau dans le milieu poreux. Le déplacement de l'eau crée une différence de pression entre les deux extrémités d'une bulle, qui se déplace ainsi, parvient dans un capillaire où l'eau circule et s'y divise en bulles plus petites qui sont entraînées par le courant. L'expulsion d'air est complète dans le cas idéal où les pores ont le même diamètre. Il n'en est plus de même si les pores présentent des rétrécissements : lorsque la bulle parvient à ce rétrécissement, la pression capillaire élevée peut équilibrer les autres pressions s'exerçant sur la bulle. Plus le gradient de pression appliqué entre les deux extrémités de l'échantillon est élevé, moins les conditions d'équilibre de la bulle ont de chances d'être satisfaites.

L'air occlus dans une bulle à l'équilibre peut sortir du corps poreux par diffusion sous forme dissoute dans l'eau. La circulation de l'eau favorise ce processus : la diffusion ne se fait plus jusqu'à l'extérieur, mais seulement jusqu'à un capillaire dans lequel l'eau en circulation entraîne l'air.

Après l'arrêt de la circulation de l'eau, la bulle peut encore se déplacer. Ceci nous amène aux facteurs de l'expulsion d'une bulle d'air. Pour un tube isolé, la condition d'expulsion s'écrit :

$$\Delta z - \Delta p > 0$$

$\Delta z$ = différence de pression hydrostatique entre le bas et le haut du tube, expression constamment positive.

$\Delta p$ = différence de pression capillaire entre le haut et le bas du tube.

Pour un réseau de tubes, il semble que les facteurs dont l'effet est traduit par la formule précédente interviennent de la même façon que pour un tube isolé. On peut donc essayer une transposition des résultats précédents aux milieux réels.

Si les rayons des pores sont à peu près réguliers, on a $\Delta p \neq 0$; l'inégalité $\Delta z - \Delta p > 0$ a beaucoup de chances d'être satisfaite pour presque tous les pores ; l'expulsion d'air est quasi totale. Lorsque les pores ont des diamètres variés, on peut admettre que statistiquement il y en a autant dont la plus grande section soit à la partie inférieure qu'à la partie supérieure. Dans la moitié des cas pour lesquels la section la plus large est en haut, on a avec nos conventions de signes $\Delta p < 0$, d'où $\Delta z - \Delta p > 0$ : expulsion d'air. Lorsque la section étroite est en haut $\Delta p > 0$, la condition d'expulsion sera satisfaite si $\Delta z > \Delta p$. On a donc d'autant plus de chances d'avoir un emprisonnement d'air par défaut d'expulsion que $\Delta p$ sera grand et donc que les différences entre les rayons seront plus grandes.

L'irrégularité de l'espace poral qui favorise l'emprisonnement d'air initial et contrarie l'expulsion de cet air augmente le volume d'air emprisonné de façon définitive. Cette irrégularité de l'espace poral se manifestant en particulier par les variations du diamètre des pores, on comprend le sens de la liaison hautement significative entre le volume d'air emprisonné et le rayon maximal des pores de chaque matériau. En effet, le rayon maximal constitue un indice de l'étendue de variation du rayon puisque les rayons les plus petits ont à peu près la même valeur pour tous les matériaux (cf. fig. 4). Le fait que les massifs de billes de verre se remplissent totalement et donc

d'une façon indépendante de leurs rayons renforce les conclusions précédentes, puisque comme on l'a déjà dit (section 3.14.) leur espace poral est assez régulier et relativement simple.

Le comportement d'un matériau vis-à-vis de l'eau dépend donc en grande partie de la configuration de son espace poral.

## IV. — INFLUENCE DE LA DIMENSION DES ÉCHANTILLONS SUR LEUR REMPLISSAGE

L'influence de la dimension a été étudiée sur un nombre limité de matériaux : craie, brique, verre mousse, calcaire à milioles et andésite. Des éléments sensiblement cubiques de dimensions différentes ont été humectés à l'air avec précaution (élévation progressive du niveau de l'eau de façon à submerger l'élément en 6 heures, puis submersion pendant 40 jours). Quoique l'épaisseur de la lame d'eau au-dessus de la partie supérieure de l'échantillon soit sensiblement la même (1 cm), les conditions d'humectation diffèrent quelque peu avec la dimension des échantillons : notamment la pression hydrostatique est d'autant plus élevée, à la base de chaque élément qu'il a une hauteur plus grande.

### 4. 1. — *Résultats*

Les résultats portés sur un graphique humidité (p. 100 de poids sec) longueur de l'arête du cube (mm) (fig. 29), se traduisent par deux catégories de courbes :

— l'humidité sensiblement constante pour les faibles dimensions décroît ensuite rapidement ; c'est le cas de tous les éléments étudiés sauf la craie. Pour la brique, on ne peut se prononcer, puisque la dimension maximale est trop petite.

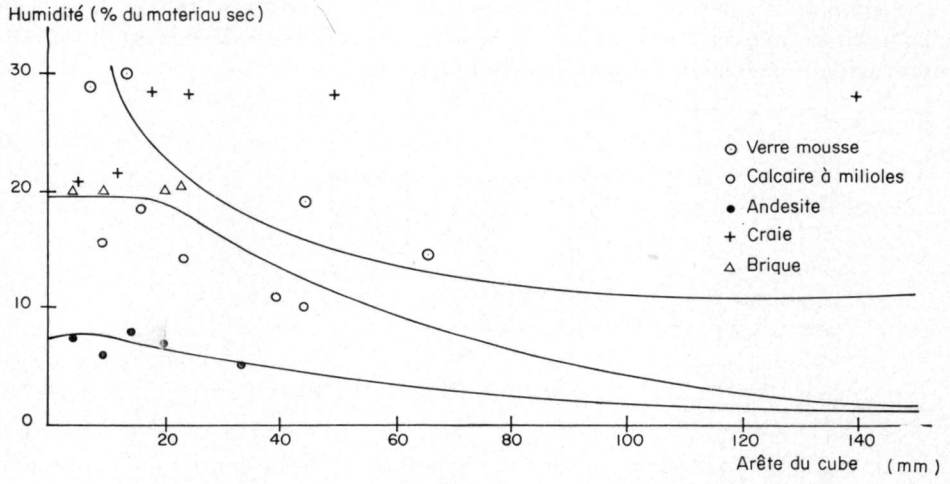



FIG. 29. — *Humectation et dimension des échantillons*

— l'humidité est indépendante de la dimension de l'échantillon pour la craie, dans la gamme des dimensions étudiées. Remarquons toutefois que, dans le cas de la craie, il y a, au voisinage de l'origine, une diminution d'humidité, qui reste inexpliquée.

### 4. 2. — *Interprétation*

Nous allons essayer de traduire ces deux catégories de courbes par une même relation entre l'humidité et la dimension des éléments. Si l'on considère, pour chaque matériau, l'abscisse du point à partir duquel l'humidité diminue lorsque la dimension croît, on constate qu'elle varie parallèlement à la hauteur d'ascension capillaire maxima (tabl. 5) pour le verre mousse, le calcaire à milioles et l'andésite. Pour la brique et la craie, qui ont des hauteurs d'ascension capillaire considérables, on s'est borné à constater que, pour des échantillons de dimensions inférieurs à la hauteur d'ascension capillaire, l'humidité était indépendante de la dimension. Cette observation n'est pas en contradiction avec ce qui a été constaté pour les trois éléments précédents et qu'on peut exprimer ainsi : *après immersion de longue durée, l'humidité d'un échantillon est indépendante de la dimension tant que celle-ci reste inférieure à une certaine valeur en liaison avec l'ascension capillaire maximale.*

TABLEAU 5

*Hauteurs d'ascension capillaire maxima* (mm)

| | |
|---|---|
| Verre mousse | 7,1 |
| Andésite | 16,5 |
| Calcaire à milioles | 18,7 |
| Brique | supérieure à 170 |
| Craie | supérieure à 370 |

Ceci nous a amené à faire l'hypothèse suivante : un élément plongé dans l'eau s'humecte sur une certaine épaisseur seulement, cette épaisseur dépendant de l'ascension capillaire maximale du matériau considéré (fig. 30).

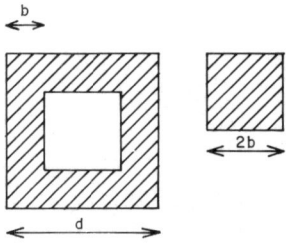



FIG. 30. — *Humectation par la périphérie des matériaux poreux*

La traduction mathématique de cette hypothèse va nous montrer qu'on retrouve ainsi la forme des courbes expérimentales. Considérons des éléments cubiques et posons :

H : humidité moyenne de l'élément (p. 100 du matériau sec)
*d* : arête du cube

$b$ : épaisseur de matériau humectée
$w$ : humidité de la zone humectée (p. 100 du matériau sec)
$d_a$ : densité apparente du matériau.

Les fronts humides se rejoignent après avoir parcouru chacun la distance $b$ (fig. 30).

L'humidité sera indépendante de la dimension et égale à $w$ pour $d$ inférieur ou égal à $2b$ : ($0 \leqslant d \leqslant 2b$, $H = w$).

Pour $d > 2b$, nous allons calculer l'humidité H de l'élément qui est le rapport du poids d'eau au poids de l'élément.

Poids eau = humidité · poids du volume humecté

$$= \frac{w}{100} d_a \left[d^3 - (d - 2b)^3\right]$$

Poids de l'élément $= d_a \cdot d^3$

$$H = \frac{w d_a \left[d^3 - (d - 2b)^3\right]}{100\, d_a\, d^3} = w \left[1 - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3\right],$$

expression constamment décroissante lorsque $d$ croît.

Pour vérifier cette formule par voie statistique, nous allons la rendre linéaire, ce qui s'obtient ici par une transformation logarithmique.

$$H = w \left[1 - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3\right] \text{ peut s'écrire : } H = w - w \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3$$

$$\frac{H - w}{w} = - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3$$

Posons $\frac{H - w}{w} = Y$ et $- \left(1 - \frac{2b}{d}\right) = X$ ; il vient $Y = X^3$.

Cette expression, dans laquelle ne figurent plus aucun des paramètres $b$ et $d$, est valable pour un point expérimental quelconque, à condition qu'il se trouve sur une des courbes définies par l'équation générale et que $d > 2b$. La transformation revient donc, entre autres, à grouper en un ensemble unique les points expérimentaux appartenant aux divers matériaux.

La transformation logarithmique de $Y = X^3$ donne $\log Y = 3 \log X$, ou en posant $\log Y = Z$ et $\log X = T$, $Z = 3T$. La vérification statistique revient à montrer que, dans l'équation de régression,

$$Z = \alpha + \beta T$$
$$\alpha = 0 = \log 1 \quad \text{et} \quad \beta = 3$$
ou que, dans $Y = AX^\beta$, $A = 1$ et $\beta = 3$

Mais il reste à préciser la valeur des paramètres $w$ et $b$ permettant de calculer X et Y. L'humidité correspondant au palier initial horizontal est $w$ : elle est déterminée par la valeur correspondant à la dimension la plus petite.

Le paramètre $b$ est plus difficile à définir. Si nous avons de bonnes raisons de penser qu'il est en relation avec l'ascension capillaire maximale $h$ de chaque matériau,

il n'est guère plausible qu'il lui soit égal : le matériau immergé s'humecte aussi sous l'action d'une charge d'eau et non sous la seule influence de la capillarité. Nous poserons $2b = ch$, $c$ étant un paramètre à déterminer. Mais comme le calcul de la régression ne nous donne que $\alpha$ et $\beta$, nous chercherons par tâtonnement la valeur de $c$ permettant d'obtenir approximativement $\beta = 3$. Pour $c = 0{,}53$, on obtient une régression significative au seuil 1 p. 100 expliquant 66 p. 100 de la variation de Z. $\alpha = 0{,}094$, ce qui donne log A = 1,916 et A = 0,82.

L'équation s'écrit alors : $Y = 0{,}82\ X^{3{,}01}$ ; elle est voisine de $Y = X^3$. Les figures 29 et 31 traduisent graphiquement les résultats de ces calculs.

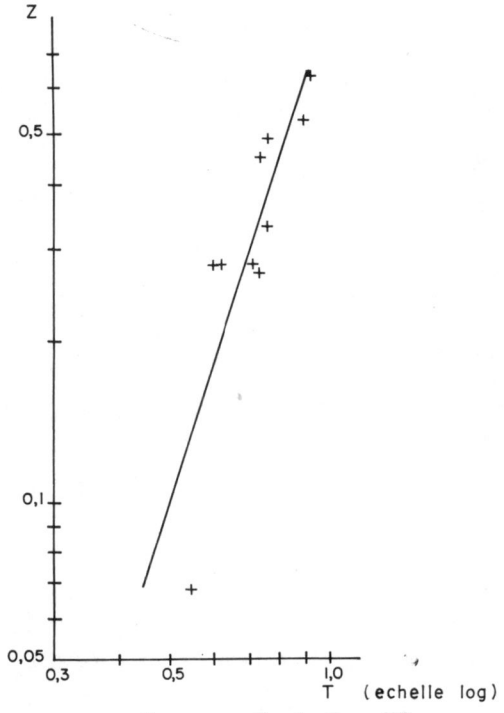



FIG. 31. — *Courbe* $Z = f(T)$

N. B. Les points sont les transformées de la courbe 29 qui satisfont à la condition $d > 2\ b$.

L'examen de la façon dont s'humectent le verre mousse et l'andésite, par fragmentation d'un échantillon préalablement immergé, montre que la pénétration de l'eau ne se fait pas sur une épaisseur d'humidité constante située à la périphérie de l'échantillon mais que l'humidité diminue de l'extérieur à l'intérieur : pour le verre mousse, les 2 à 3 mm extérieurs avaient une humidité de 71,9 p. 100, le centre ayant une humidité de 4,9 p. 100 seulement ; les 3 cm extérieurs de l'andésite ont une humidité de 4,7 p. 100, alors qu'au centre, elle est de 3,4 p. 100 ; on peut penser qu'avec des éléments de plus grandes dimensions, l'humidité est nulle au centre.

Le mécanisme de l'humectation est donc plus complexe que ne le suggère l'hypothèse à la base du calcul précédent. Ce dernier peut cependant être conservé si l'on admet que l'humidité au voisinage de la périphérie de l'élément est constante et égale

à « $w$ » ; le paramètre « $b$ » est une valeur fictive ainsi définie si H($y$) est l'humidité pour l'abscisse $y$ :

$$b \cdot w = \int_0^n \mathrm{H}(y) \cdot dy,$$

$n$ étant la valeur de $y$ pour laquelle l'humidité du matériau est nulle.

Parce qu'il utilise un schéma simplifié de la réalité, le modèle mathématique proposé rend compte du comportement des matériaux en première approximation.

En conclusion :

— Au-delà d'une certaine dimension en liaison avec la hauteur d'ascension capillaire maximale, l'humidité moyenne d'un élément poreux immergé (exprimée en p. 100 du matériau sec) décroît lorsque la taille de l'élément considéré augmente.

— La variation de l'humidité H de l'échantillon peut s'exprimer en fonction de la longueur de l'arête et de deux paramètres : l'un $b$ est proportionnel à la hauteur d'ascension capillaire maximale, l'autre $w$ est l'humidité d'un élément cubique de 5 mm de côté. L'équation précédemment écrite relie ces diverses quantités et paraît valable en première approximation.

— Cette équation est en fait une formule semi-empirique indiquant *comment* varie l'humidité d'un matériau poreux quelconque en fonction de sa dimension, lorsqu'il est humecté dans des conditions définies. Nous n'avons pas proposé de justification théorique de l'intervention d'un paramètre proportionnel à la hauteur d'ascension capillaire maximale. Peut-être cette dernière n'intervient-elle que parce qu'elle est en corrélation avec la succion du matériau, qui joue un rôle sur l'emprisonnement d'air. Il faut en effet remarquer que, quoique l'humectation soit faite avec précaution, l'échantillon est submergé au bout de 6 heures et que des emprisonnements d'air sont possibles avant submersion du seul fait de l'intervention de la capillarité.

Malgré les réserves précédentes qui concernent seulement l'interprétation théorique, les éléments poreux rigides immergés s'humectent d'autant moins qu'ils sont plus grands, une fois dépassée une certaine dimension limite proportionnelle à l'ascension capillaire maximale.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*

## SUMMARY

### EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

### I. — BEHAVIOUR OF THE COARSE AND POROUS CONSTITUENTS WITH RESPECT TO WATER

Total porosity and the pore distribution feature both natural and synthetic porous materials.

The pore-water content is investigated under several conditions *i. e.*, careful but quick moistening at atmospheric pressure, and in vacuo.

Following moistening carried out promptly but carefully part of the voids remain air-filled the proportion of such voids featuring each material.

Theoretical and experimental investigations of the trapping of the air have shown that the more uneven is pore distribution the more substantial is such trapping.

Since the maximum pore radius is an indication of such uneveness, this explains the diminution between the maximal pore radius and the volume of trapped air expressed in per cent of the effective porosity.

## ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE DYNAMIK DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENEN WASSERS

I. — VERHALTEN PORÖSER GROBER BESTANDTEILE GEGENÜBER DEM WASSER

Ein Kennzeichen der natürlichen und synthetischen porösen Substanzen besteht in ihrer vollständigen, offenen Porosität und der Formation ihres porösen Raums.

Der Grad der Füllung der offenen Poren mit Wasser wurde unter verschiedenen Bedingungen untersucht : Schnelle, vorsichtige Befeuchtung, unter Atmosphärendruck und im Vakuum.

Bei vorsichtiger Befeuchtung bleibt ein Teil der offenen Poren von Luft besetzt ; die Grösse des mit Luft gefüllten Anteils an offenen Poren bildet ein Kennzeichen jeder Art Material.

Die theoretische und experimentelle Untersuchung des Systems der Einschliessung der Luft ergibt, dass diese Einschliessung umso erheblicher ist, je unregelmässiger der Poröse Raum gestaltet ist.

Da der grösste Porenradius eine Anzeige dieser Unregelmässigkeit ist, ist der Grund für die parallel laufende Abnahme des grössten Porenradius und des (in Prozenten der offenen Porosität ausgedrückten) eingeschlossenen Luftvolumens verständlich.

## РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.

I. Поведение крупных элементов сопротивляющихся воде.

Р. ГРА.

Естественные и искуственные пористые материалы характеризуются их общей открытой порозностью и геометрией их порозного пространства. Степень заполнения открытой порозности влагой изучалась в различных условиях : быстрое увлажнение, осторожное увлажнение и увлажнение в вакууме.

После осторожного увлажнения часть открытой порозности остается занятой воздухом; размеры фракции открытой порозности заполненной воздухом характерны для каждого отдельного материала.

Теоритическое и экспериментальное изучение механизмов защемления воздуха показывает что оно тем более интенсивно, чем больше выражена нерегулярность порозного пространства.

Так-как максимальный радиус пор является признаком этой нерегулярности, можно легко понять причины регрессии существующей между максимальмым радиусом пор и об'емом воздуха выраженным в процентах открытой порозности.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARRER R. M., 1948. Fluid flow in porous media. *Faraday Soc.*, discussion n° 3, p. 61.

CASSIE A. B., BAXTER S., 1944. Wettability of porous surface. *Trans. Faraday Soc.*, **40**, S 46.

FATT I., 1956. The network model of porous media. I. Capillary pressure characteristics. *Trans. Aime*, **207**, 144-159.

GRAS R., 1969. Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux. *Sci. sol*, **2**, 79-89.

GRATON L. C., FRASER H. J., 1935. Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *Journ. of Geol.*, **43**, 785-909.

GREMY F., PAGÉS J.-C., 1966. *Éléments de biophysique.* Flammarion, 1 vol.

KEEN B. A., 1931. *Physical properties of the soil*, Longmans, 1 vol, 380 p.

MOREL-SEYTOUX, 1969. *Introduction to flow of immiscible liquids in porous media*, in J. M. de WIEST : *Flow through porous media.* Academic press, 1 vol.

ROSE W., WITHERSPOON P. A., 1956. Studies of waterflood performance. II. Trapping oil in pore doublet. *Illinois State geological survey*, Circular 224.

TURC L., Communication personnelle.

WENZEL R. N., 1936. *Industr.Engng. Chem.*, **28**, 988.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* : (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part.* Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Correction des épreuves :* les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

*Le directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-1972

*Dépôt légal: 2e trimestre 1972. N° d'impression:* 554.

# annales agronomiques

Bimestriel

1972

Vol. 23 . N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1972, **23** (3), 247-316.

# EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX

## II. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers. variations positives d'humidité [1]

R. GRAS

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

Un sol contenant des cailloux est un système hétérogène constitué de deux matériaux, la terre fine et les cailloux, désignés aussi sous le terme d'éléments grossiers.

La dynamique de l'eau dans un tel système a été étudiée expérimentalement en utilisant des tubes pleins d'un sol sableux renfermant des éléments grossiers de forme géométrique définie.

On a d'abord étudié leur influence sur la cinétique du front humide avançant dans un sol sableux initialement sec, dans diverses conditions d'alimentation en eau : infiltration avec plan d'eau, humectation verticale et horizontale. Les résultats expérimentaux ont été interprétés dans les cas simples à l'aide des lois de l'hydrodynamique.

Une fois le système humecté, on examine l'effet des éléments grossiers sur la transmission de l'eau par le système. Tous les éléments diminuent la perméabilité globale du système.

Au cours des expériences précédentes, les éléments grossiers poreux peuvent s'humecter à partir du sable. Les variations d'humidité enregistrées tiennent à la nature des matériaux grossiers et aux succions exercées par le sol sableux et les éléments grossiers sur l'eau.

## INTRODUCTION

Nous étudions la dynamique de l'eau dans le système hétérogène terre fine éléments grossiers, en nous limitant aux phénomènes provoquant une variation positive d'humidité et à la transmission de l'eau saturante par le système.

Une attention particulière est attachée aux conséquences de la dynamique de l'eau dans la terre fine sur le remplissage des éléments grossiers poreux, puisque la quantité d'eau absorbée par ces éléments va déterminer leur contribution éventuelle à l'alimentation en eau de la végétation.

[1] Deuxième partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg.

Les modalités de la circulation de l'eau dans la terre sont très variées et on peut classer l'ensemble des cas suivant plusieurs critères.

Un de ceux-ci considère le degré de remplissage de la porosité ouverte. Lorsque cette porosité est entièrement occupée par l'eau, celle-ci est dite *saturante* ; elle n'est soumise à aucune tension d'origine capillaire et la pression hydrostatique s'y transmet intégralement. L'eau est dite *non saturante*, lorsqu'une phase gazeuse subsiste à côté de la phase liquide. Si cette phase gazeuse est isolée de l'atmosphère extérieure (air emprisonné), les propriétés de l'eau saturante, et notamment, la transmission des pressions hydrostatiques, sont conservées, du moins avec une approximation convenable. Par contre, lorsque la phase gazeuse communique avec l'atmosphère extérieure, l'eau est soumise à des actions capillaires et la transmission des pressions est considérablement perturbée.

D'un autre point de vue, on peut considérer la variation dans le temps de la teneur en eau du sol. La *filtration* est la transmission de l'eau d'une extrémité à l'autre de l'échantillon considéré comme saturé, son humidité est alors constante. Lorsque l'eau pénètre dans un sol sec, l'humidité en arrière du front humide étant voisine de la saturation et relativement constante, on parle d'*infiltration*. Le terme *humectation* désigne l'augmentation de la teneur en eau non saturante et le terme *dessiccation* le phénomène inverse.

Les cas réels n'appartiennent pas toujours à une catégorie bien définie. Par exemple, lorsque l'eau s'infiltre *per descensum* dans un sol sec, on n'est pas assuré que l'eau soit saturante dans toute l'épaisseur de sol humecté ; mais surtout des actions capillaires importantes se produisent à la limite terre humide-terre sèche.

Aussi, nous n'étudierons pas l'action des éléments rigides dans l'ensemble du domaine de la circulation de l'eau, mais nous considérerons seulement quelques situations particulièrement importantes dans le milieu naturel :

— circulation *per descensum* à la suite de l'*existence d'un plan d'eau* d'épaisseur constante à la surface du sol. Cette situation se produit dans le milieu naturel lorsqu'une lame d'eau s'établit à la surface du sol. On considérera deux phases successives : la pénétration de l'eau dans un sol sec que nous désignerons par infiltration, même si la saturation n'est pas totale et la transmission de l'eau par le sol en principe saturé, la filtration ;

— circulation *per descensum* par apport d'eau à débit constant, sans établissement d'une lame de liquide à la surface du sol. Ce cas, fréquent dans le milieu naturel, sera désigné par humectation verticale ;

— circulation horizontale de l'eau dans un sol sec sous l'influence de la succion du sol : humectation horizontale ;

— dessèchement du sol sous l'influence d'une succion. C'est un processus de dessèchement se produisant dans le sol au voisinage des racines, ou d'une surface évaporante.

Pour déceler les modifications apportées à l'écoulement de l'eau dans un milieu meuble par la présence de matériaux grossiers, il importe d'abord de connaître l'écoulement de l'eau dans le milieu meuble seul pour les différents cas envisagés précédemment. C'est pourquoi nous étudierons d'abord la dynamique de l'eau dans le sable.

## I. — DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SABLE

Après une brève description du dispositif expérimental utilisé et un rappel des lois de la circulation de l'eau dans les milieux poreux, nous examinerons comment ces lois s'appliquent au matériau meuble choisi.

### 1. 1. — *Dispositif expérimental*

L'étude a été réalisée en utilisant des tubes cylindriques transparents de diamètre intérieur 5 cm environ, remplis de sable fin dit de Fontenay, décrit ultérieurement (en 5. 11) ; en effet la finesse de certaines de ses particules assure un bon contact avec le matériau rigide, et l'état de ce contact est indépendant de l'humidité, puisque ce sable ne gonfle pratiquement pas. Le sable a été introduit par fraction de 50 g et tassé au maximum avec un piston constitué d'un bouchon de caoutchouc placé au bout d'une tige. Il a fallu prévoir, à la base du tube, un dispositif retenant le sable fin, tout en modifiant le moins possible l'écoulement de l'eau. Nous avons choisi de fermer le tube à sa base par un grillage supportant une couche de quelques centimètres de sable grossier (diamètre des grains 2 mm), surmontée d'un grillage de maille 0,4 mm. Le sable fin pénètre un peu dans la couche de sable grossier, mais est vite arrêté, ce qui permet de réaliser un tassement homogène du sable fin au-dessus. Nous avons préféré utiliser ce dispositif plutôt qu'un papier-filtre ; en effet, on n'était pas assuré que ce dernier ne se colmaterait pas partiellement par les quelques éléments fins entraînés lors de la percolation, ou ne modifierait pas l'écoulement par sa seule présence.

Selon le type d'écoulement étudié, des modifications de détail ont été apportées au montage des tubes et nous les signalerons ultérieurement.

Les caractéristiques du sable tassé dans le tube sont :

— densité apparente = 1,47
— densité réelle = 2,65
— porosité calculée à partir des paramètres précédents : 44 p. 100
— ascension capillaire maxima = 70 cm (mesurés au bout de 500 heures).

### 1. 2. — *Généralités sur la circulation de l'eau dans un milieu poreux*

#### 1. 21. *Eau saturante. Loi de Darcy.*

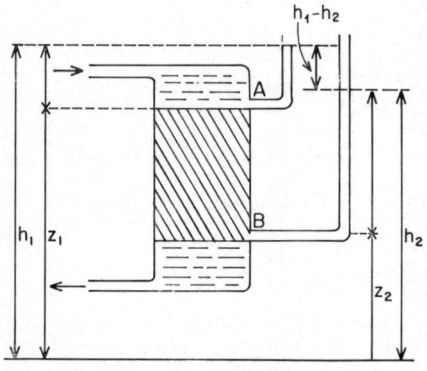



FIG. 1. — *Loi de Darcy*

On fait circuler de l'eau dans un système (fig. 1) constitué par un matériau poreux de section constante S et de longueur $l$ que nous appellerons *filtre* ; les indications des piézomètres placés en A et B aux extrémités du filtre étant $h_2$ et $h_1$, le débit D est donné par la formule :

$$D = - KS \frac{h_2 - h_1}{l}$$

c'est la loi de Darcy. En posant

$h = h_2 - h_1$, différence des charges hydrauliques, on a : $D = - KS\, h/l$.

La vitesse brute fictive est $V = D/S$ :

$$V = - K \frac{h}{l}$$

Calculons en hauteur d'eau les pressions $p$ mesurées par les piézomètres, $\rho$ étant le poids spécifique de l'eau.

En A : $p_1 = \rho\,(h_1 - z_1)$ ce qui donne $h_1 = z_1 + p_1/\rho$

B : $p_2 = \rho\,(h_2 - z_2)$ $\qquad h_2 = z_2 + p_2/\rho$

Les expressions telles que $h_2$ et $h_1$ appelées *charges* hydrauliques sont la somme de deux termes : l'un $z$ est la charge due à la gravité (mesurée par la cote) et l'autre $p/\rho$ est la charge due à la pression.

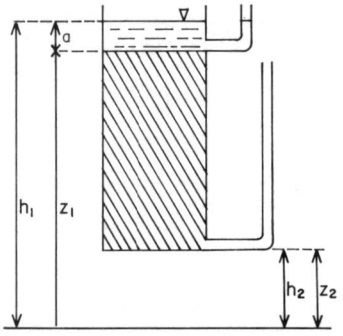



FIG. 2. — *Loi de Darcy, dans le cas de l'existence d'un plan d'eau en surface*

Lorsqu'on maintient une lame d'eau d'épaisseur constante « $a$ » au-dessus du filtre et que l'eau s'écoule librement à la base (fig. 2),

on a : $h_1 = z_1 + a$

$h_2 = z_2$

et la loi de Darcy s'écrit :

$$D = -\,KS\,\frac{(z_1 + a) - z_2}{l}$$

$$= -\,KS\,\frac{(a + z_1 - z_2)}{l}$$

comme $z_1 - z_2 = l$

$$D = -\,KS\,\frac{(a + l)}{l}$$

La quantité $(h_2 - h_1)/l$, quotient d'une différence de charge par une différence de longueur, s'appelle le gradient hydraulique ; la loi de Darcy peut donc encore s'écrire ainsi :

$$D = -\,KS\,\frac{dh}{dl}$$ , $h$ étant un potentiel.

On peut alors exprimer cette loi sous forme vectorielle

$\vec{D} = -\,K\,\overrightarrow{\text{grad}\,h}$ ou $\vec{D} = -\,K \cdot \nabla h$, $\quad \nabla$ étant l'opérateur $\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$

$\vec{D}$ est la densité de flux d'eau, quantité d'eau transmise par unité de temps et par unité d'aire d'une surface normale à la direction de l'écoulement. On retrouve la formulation de lois phénoménologiques, comme celle d'Ohm pour l'électricité. Nous utiliserons ultérieurement l'analogie de la loi de Darcy avec cette dernière loi.

### I. 22. *Eau non saturante* (GARDNER, 1958 ; SWARTENDZRUBER, 1969).

Lorsque le milieu n'est plus saturé et que la phase gazeuse communique avec l'extérieur, l'eau se déplace encore sous l'influence d'une différence de potentiel $h$, ce qui donne une expression analogue à la loi de Darcy : $D = -\,K\,\text{grad}\,h$. L'existence de la phase gazeuse a deux conséquences

sur les termes de cette équation. D'une part, la perméabilité K est plus faible qu'en milieu saturé, puisque la section utile pour la circulation du liquide est plus petite et cette perméabilité K dépend de l'humidité H : K = K(H). La présence dans certains pores d'une interface air-eau entraîne une modification de la fonction potentiel $h$, la composante de pression devenant une succion $\psi$ et la composante $z$ due à la gravité restant inchangée ; cette succion est, elle aussi, fonction de l'humidité H : $\psi = \psi(H)$. Le potentiel s'écrit donc : $h = z - \psi(H)$ et on obtient :

$$D = K(H) \cdot [\nabla z - \nabla \psi(H)]$$

pour la circulation verticale *per descensum*.

A la différence de ce qui se passe lorsque la loi de Darcy est applicable, l'humidité H est une fonction des coordonnées $x, y, z$ du point considéré dans le milieu poreux et du temps $t$ : $H(x, y, z, t)$.

Cette humidité peut être théoriquement obtenue à partir d'une équation aux dérivées partielles qu'on établit à partir de l'équation précédente et du principe de la conservation de la masse.

$$\frac{\partial}{\partial x}\frac{(M\,\partial H)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\frac{(M\,\partial H)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\frac{(M\,\partial H)}{\partial z} + \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial H}{\partial t},$$

M étant l'expression $K(H) \cdot (\partial\psi/\partial H)$.

Cette équation aux dérivées partielles décrit, suivant les conditions initiales et les conditions aux limites imposées, l'humectation du sol, son dessèchement, etc.

## 1. 3. — *Filtration en tube vertical avec plan d'eau*

La loi de Darcy s'appliquant aux matériaux meubles homogènes, nous nous sommes limité à l'étude de quelques points précis :

— incidence d'une humectation brutale ou ménagée sur la perméabilité ;

— stabilité des débits dans le temps.

### 1. 31. *Méthode d'étude.*

Deux catégories de tubes ont été utilisées avec des modes d'humectation différents.

Les tubes courts, comprenant une épaisseur de 20 cm de sable sur une couche de 3 cm de sable grossier ont été humectés de deux façons :

— humectation progressive, par capillarité : La partie inférieure du tube est plongée dans l'eau, dont on élève progressivement le niveau, de façon qu'il reste au-dessous du niveau du front humide dans le sable ; la colonne de terre est humectée en 30 minutes. Ensuite, on amène le niveau de l'eau au niveau supérieur du sable et on laisse les choses en l'état pendant 17 heures avant de réaliser la filtration ;

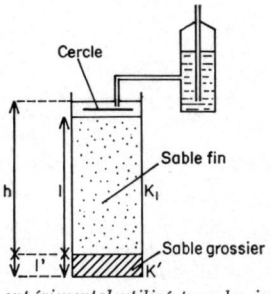



FIG. 3. — *Dispositif expérimental utilisé pour les infiltrations et filtrations*

— humectation rapide obtenue en établissant brutalement une lame d'eau de 1 cm à la surface du sable ; les débits transmis sont mesurés une fois que le front humide est parvenu à la base du tube.

Pour des raisons qui seront données plus tard, on a utilisé aussi des tubes longs avec une

épaisseur de 48 cm de sable de Fontenay sur 2 cm de sable grossier. Tous ces tubes ont été humectés rapidement, comme cela est décrit dans le paragraphe précédent ; les débits transmis ont été mesurés de la même façon.

On a établi une lame d'eau de 1 cm d'épaisseur à la surface du sable au moyen d'un vase de Mariotte gradué utilisable comme débitmètre (fig. 3). Pour éviter l'érosion de la surface par cette arrivée d'eau, on a placé à 5 mm au-dessus du niveau du sol un cercle métallique de diamètre inférieur à celui du tube.

Les débits en filtration étaient mesurés en pesant l'eau recueillie à la base du tube, le temps zéro correspondant à la chute de la première goutte de la base du tube.

### I. 32. *Résultats.*

Dans tous les cas, la quantité d'eau recueillie à la base du tube est proportionnelle au temps (fig. 4). L'instabilité structurale, le gonflement et la dispersion de colloïdes par l'eau interviennent de façon négligeable.

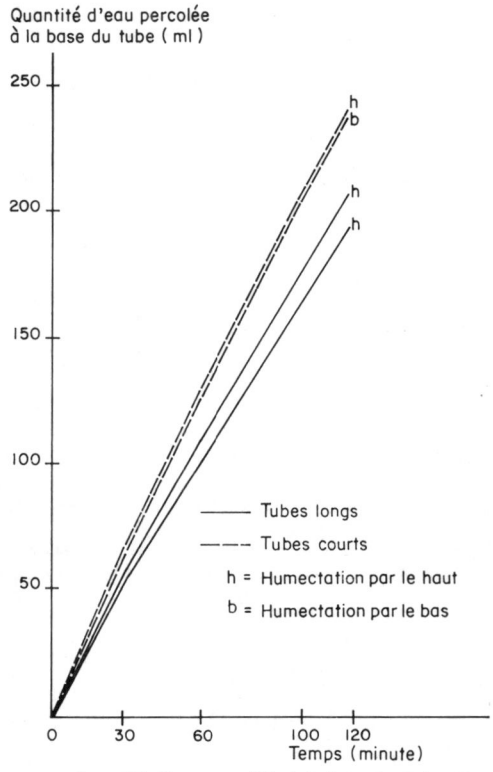



FIG. 4. — *Quantité d'eau recueillie à la base des tubes témoins*

Les modes d'humectations, dont l'influence a été étudiée seulement pour les tubes courts, n'interviennent pas de façon sensible sur les débits : en une heure, 152 ml avec humectation progressive et 148 ml avec humectation brutale.

Les différences entre les quantités d'eau transmises par les tubes longs, tous humectés rapidement, étaient faibles : 5,7 p. 100 de la moyenne au bout d'une heure, 6,5 p. 100 au bout de 2 heures. De telles différences tiennent au fait qu'il n'est pas possible de remplir les tubes de sable de façon identique ; la reproductibilité est cependant convenable.

Ces manipulations ayant aussi pour but de déterminer le coefficient de perméabilité du sable de Fontenay, on a comparé les valeurs fournies par les tubes longs et les tubes courts. Les dispositifs utilisés sont des filtres complexes, puisqu'ils comprennent une couche de sable fin d'épais-

seur $l$ et de perméabilité $K_1$ à déterminer, surmontant une couche de sable grossier de longueur $l'$ et de perméabilité $K'$. Le débit du filtre complexe est, d'après SCHNEEBELI (1966) :

$$D = \frac{S\,(h + l')}{l/K_1 + l'/K'} \qquad \text{(fig. 3)}$$

Nous avons utilisé cette formule pour calculer $K_1$ ; en effet, la formule simplifiée négligeant le fait que le filtre est complexe et prenant comme charge « $h$ » et comme longueur du filtre « $l$ » introduit une erreur appréciable, du moins pour les tubes courts (Annexe 3). Comme un peu de sable fin a pénétré dans le sable grossier occupant 12 p. 100 de sa porosité, la valeur de la perméabilité du sable grossier, 15,5 cm/mn, a été arrondie à 15.

Les résultats sont exprimés en cm/mn :

Tubes courts, humectation par le bas = 0,072 9
humectation par le haut = 0,076 8
Tubes longs humectés par le haut = 0,071 4

Il n'y a pas d'influence sensible du mode d'humectation et de la longueur des tubes.

Pour des tubes courts, l'erreur est de 5,2 p. 100 et pour les tubes longs de 4,8 p. 100 ; ces erreurs sont supérieures à celles données par le calcul d'erreur (Annexe 4), certainement parce que ce dernier ne prend pas en compte les différences de tassement du sable d'un tube à l'autre.

Nous prendrons en définitive comme valeur de la perméabilité du sable de Fontenay $K_1 = 0{,}07$ cm/mn.

### 1. 4. — *Infiltration dans un tube vertical avec plan d'eau en surface*

Comme le sable est initialement sec, l'humectation peut être suivie par le déplacement du front humide. La variation de la cote du front humide $z$ en fonction du temps $t$ est une courbe.

Pour mettre en évidence l'influence d'un élément grossier, on pourrait comparer un tube témoin sans élément à un tube avec élément. Mais les conditions expérimentales (tassement du sable, établissement du plan d'eau à l'instant initial) pouvant être différentes entre les deux tubes, il serait préférable d'utiliser un seul tube. C'est ce que nous avons fait, en remarquant ceci :

Lorsqu'on humecte un tube vertical de sol sec renfermant un élément grossier dont la partie supérieure est à la cote $z_1$ (les cotes sont comptées positivement vers le bas à partir de l'extrémité haute du filtre), la circulation de l'eau n'est pas modifiée par l'élément grossier dans l'intervalle $0 — z_1$. Supposons qu'on puisse déterminer la courbe $z = f(t)$ de la cote $z$ du front humide en fonction du temps $t$, à l'aide des seules observations de l'intervalle $0 — z_1$ ; on pourra alors par extrapolation décrire le déplacement du front humide qui se serait produit s'il n'y avait pas eu d'élément grossier et ainsi mettre en évidence l'effet de ce dernier. En outre, la connaissance de l'équation $z = f(t)$ pourra être utile pour l'interprétation des résultats expérimentaux. Pour établir cette équation, on utilisera l'homologie entre la circulation de l'eau dans un tube capillaire et dans un filtre.

#### 1. 41. *Homologie entre la circulation de l'eau dans un tube capillaire et dans un filtre.*

DE WIEST (1969) signale l'homologie précédente pour la loi de Poiseuille et la loi de Darcy. A la vitesse réelle du fluide dans un capillaire, correspond une valeur hydraulique moyenne, la vitesse brute fictive, quotient de la quantité d'eau percolée par la section du filtre.

| *Loi de Poiseuille* | *Loi de Darcy* |
|---|---|
| Capillaire de section $\pi r^2$<br>$n$ = viscosité de l'eau<br>Vitesse réelle : $v$ | Filtre de section S<br><br>Vitesse brute fictive : V |
| $v = \frac{r^2}{8n}\frac{dh}{dl}$ | $V = K\frac{dh}{dl}$ |
| $D = \pi r^2 \cdot \frac{r^2}{8n} \cdot \frac{dh}{dl}$ | $D = KS\frac{dh}{dl}$ |

On a les correspondances suivantes :

| | |
|---|---|
| $r^2/8n$ | K |
| $\pi r^2$ | S |

On peut donc espérer transposer à un milieu poreux les équations écrites pour les tubes capillaires.

1. 42. *Calcul de l'équation de la cinétique du front humide.*

Dans un tube capillaire de rayon $r$, l'eau se déplace sous l'influence de son poids et de la pression capillaire.

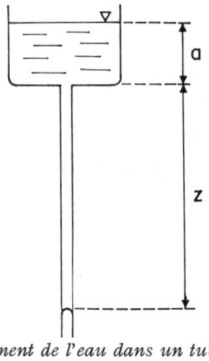



FIG. 5. — *Déplacement de l'eau dans un tube capillaire vertical*

Le débit $D = dq/dt$ s'écrit avec les notations de la figure 5, $q$ étant la quantité d'eau :

$$D = \frac{dq}{dt} = \frac{\pi r^4}{8n}\left(\frac{z + a + \psi}{z}\right) = \pi r^2 \cdot (r^2/8n)\left(1 + \frac{a + \psi}{z}\right).$$

On a entre capillaire et filtre les correspondances suivantes :

| Capillaire | Filtre |
|---|---|
| $z$ = cote du ménisque | $z$ = cote du front humide |
| $\pi r^2$ | S |
| $r^2/8n$ | K |
| $q$ = quantité d'eau contenue dans la hauteur $z$ de capillaire | Q = quantité d'eau saturant sur l'épaisseur $z$ un filtre de porosité P. |

La transposition permet d'écrire pour le filtre : $D = KS(z + a + \psi)/z$.

COURAU (1967) a vérifié la validité de cette loi sur un milieu poreux artificiel, ce qui justifie *a posteriori* cette démarche de transposition.

Il faut maintenant relier le débit D du filtre à la cote $z$ du front humide. P étant la porosité : $Q = (P/100)\, Sz$, d'où $D = dQ/dt = (PS/100)\, dz/dt$. En portant D dans l'équation précédente :

$$D = (PS/100)\,(dz/dt) = KS\,(z + a + \psi)/z$$

$$dz/dt = (100K/P)\,(z + a + \psi)/z$$

$$\frac{z \cdot dz}{z + a + \psi} = (100\,K/P)dt$$

En remarquant que :

$$\frac{z}{z + a + \psi} = \frac{z + a + \psi - (a + \psi)}{z + a + \psi} = 1 - \frac{a + \psi}{z + a + \psi},$$

on intègre l'équation précédente. Pour calculer la constante d'intégration, on écrit que pour $t = 0$, $z = 0$. En définitive :

$$z + (\psi + a)\,\mathrm{Log}\left(\frac{\psi + a}{z + \psi + a}\right) = (100\ K/P)\ t$$

Le calcul de la quantité d'eau consommée cumulée au temps $t$ s'effectuerait à partir de l'équation du débit où l'on remplacerait $z$ par sa valeur en fonction de $t$ ; cela n'est pas possible, parce que l'équation reliant $z$ à $t$ est implicite.

### 1. 43. *Examen de la validité de l'équation pour rendre compte de la cinétique du front humide dans le sable.*

Pour écrire l'équation dans le cas du tube plein de sable, il faut disposer des valeurs numériques de $\psi$, K et P pour le sable dans les conditions d'infiltration.

On peut tourner la difficulté pour K et P, en posant $A = 100\ K/P$, ce qui donne

$$z + (\psi + a)\,\mathrm{Log}\left(\frac{\psi + a}{z + \psi + a}\right) = At$$

Si A est sensiblement constant au cours d'une expérience, la formule sera valable.

Pour $\psi$, on sait que l'ascension capillaire dans le sable se poursuit encore au bout de 500 heures, ce qui est normal puisque ce matériau peut être assimilé à un faisceau de capillaires de diamètres différents. En effet, les ménisques dans les gros capillaires atteignent rapidement la hauteur maxima, tandis que les ménisques des capillaires étroits s'élèvent plus haut mais plus lentement.

Une tentative de calcul faite en utilisant pour $\psi$, 70 cm (hauteur de l'ascension au bout de 500 heures) donne une valeur de A sensiblement constante (de 0,17 au début de l'expérience à 0,14 à la fin — valeur moyenne 0,15).

En fait, cette constatation ne saurait constituer une vérification de l'exactitude de la valeur de $\psi$, puisqu'il existe un ensemble de valeurs du couple $\psi$, A qui satisfont à un bon ajustement, comme on l'a vérifié.

De plus, la valeur de A n'est guère compatible avec le fait que le sable n'est pas saturé. Le rapport $z/Q$, de la cote du front humide à la quantité d'eau entrée dans le filtre, est sensiblement constant au cours d'une expérience (0,133 au début — 0,129 à la fin — moyenne = 0,131).

Ceci entraîne que le coefficient de remplissage de la porosité du sable (quotient de la quantité Q d'eau présente dans une épaisseur $z$ de sable par le volume de la porosité correspondante, est aussi constant et égal à 0,74 seulement : en effet, ce coefficient est $PSz/100\ Q$.

On peut, en écrivant $A = 100\ \alpha\ K/\beta\ P$, évaluer le coefficient $\alpha$ de réduction de la perméabilité : avec A = 0,15, K = 0,07, P = 45,4, $\beta$ = 0,74, on trouve $\alpha$ = 0,70. Il est assez surprenant qu'une occupation par l'eau de 74 p. 100 de la porosité s'accompagne d'une réduction aussi importante (70 p. 100 de la perméabilité). En effet, comme, d'une part, l'eau circule au cours de l'infiltration dans les gros capillaires et comme, d'autre part, le débit transmis par un capillaire varie comme le carré de son diamètre, la diminution de perméabilité consécutive au non remplissage temporaire des petits capillaires devrait être moins marquée que ne le prévoit le calcul ci-dessus.

Comme la valeur de A dépend de la valeur de $\psi$, prise ici égale à 70 cm (ascension capillaire

au bout de 500 heures), on a tenté un nouveau calcul de A en introduisant des valeurs plus basses de $\psi$ : par exemple, avec $\psi = 53$ cm, on obtient $A = 0{,}185$, ce qui donne $\alpha = 0{,}8$. Malheureusement, l'accord entre les valeurs de $z$ calculées et observées est nettement moins bon. Aussi avons-nous conservé $\psi = 70$ cm dans tous les calculs.

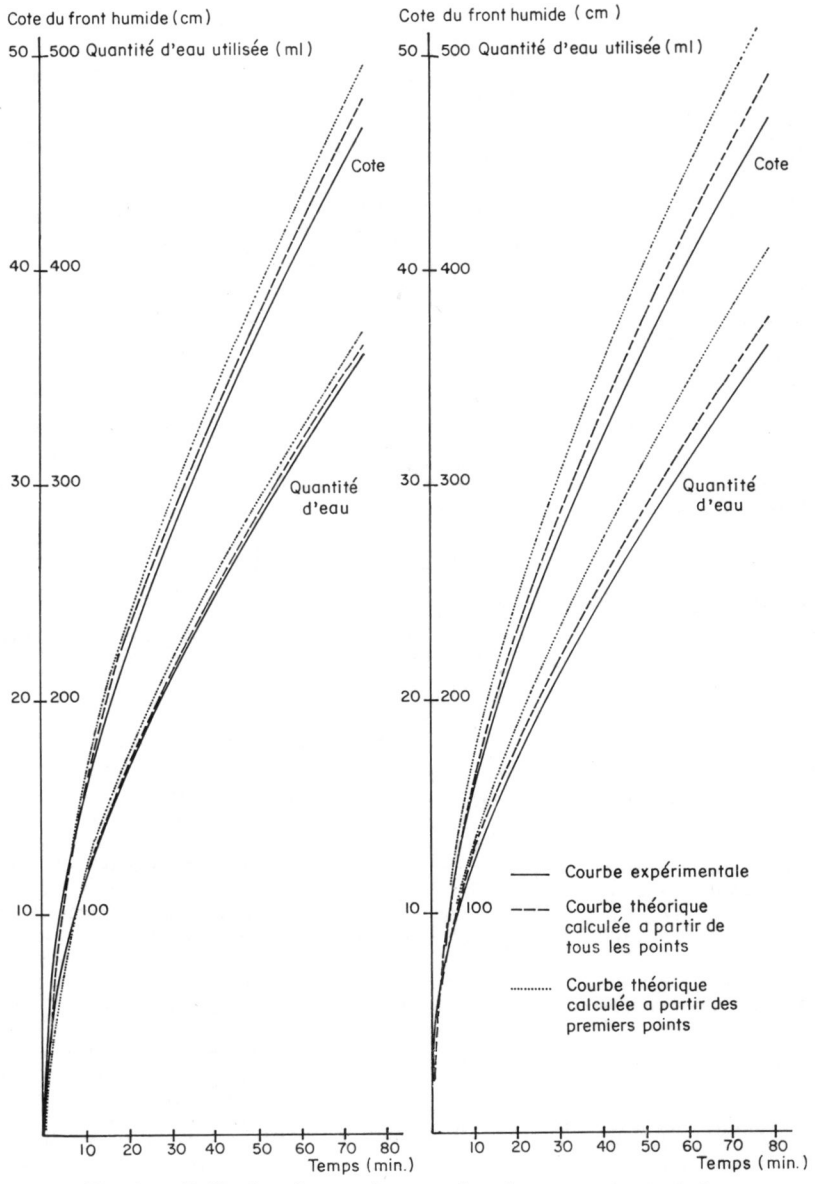



FIG. 6. — *Infiltration. Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées pour la cote du front humide et la quantité d'eau absorbée*

Pour deux tubes contenant seulement du sable, l'erreur relative maxima entre cotes observées et calculées est de 2,7 p. 100 pour une expérience et de 2,3 p. 100 pour l'autre ; la figure 6 montre comment se placent les points correspondants.

Il est intéressant de remarquer qu'une équation transposée de celle rendant compte de l'avancement du ménisque dans un capillaire saturé, décrit la cinétique du front humide dans un

filtre qui n'est pas saturé. Tout se passe comme si un modèle convenable du sable était constitué par un faisceau de capillaires de diamètres différents n'échangeant pas d'eau entre eux. La cote du front humide serait celle des ménisques dans les capillaires les plus larges pour lesquels la vitesse est la plus grande d'après la loi de Poiseuille (cf. 1. 41 et 1. 42) :

$$v = \frac{r^2}{8n} \cdot \frac{dh}{dl} = \frac{r^2}{8n}\left(1 + \frac{a + 2\,T_{EA}/r}{z}\right) = (1/8n)\left[r^2\left(1 + \frac{a}{z}\right) + r\,\frac{2\,T_{EA}}{z}\right]$$

Ceci est cependant surprenant, puisque, en deçà du front humide, les petits capillaires prélèvent une certaine quantité d'eau pour s'humecter.

1. 44. *Possibilité d'extrapolation de la courbe calculée à partir des premiers points expérimentaux.*

Maintenant que nous avons vérifié la validité de l'équation reliant la cote $z$ du front humide au temps $t$, nous allons examiner si un calcul de A basé sur les premiers points expérimentaux (cf. section 1. 4) est encore valable. La figure 6 montre que l'accord entre le calcul et la réalité est encore convenable, l'erreur relative maxima sur $z$ étant de 11,4 p. 100 pour une expérience et de 4 p. 100 pour l'autre.

Pour étudier l'influence d'un élément grossier sur la dynamique de l'eau dans le sable, on utilisera un seul tube, celui contenant l'élément grossier, dont la partie supérieure sera à la distance $z_1$ de la surface du sable. L'observation directe fournit la courbe $z$ — $t$ en présence d'éléments. Les points expérimentaux obtenus dans l'intervalle 0, $z_1$ permettent de calculer l'équation de la courbe $z$ — $t$ qui aurait existé s'il n'y avait pas eu d'élément grossier.

Comme il n'est pas possible de relier au temps $t$ la quantité d'eau utilisée Q, on peut construire la courbe $Q(t)$ en utilisant le fait que le rapport $z/Q$ est sensiblement constant, comme on l'a vu en 1. 43.

## 1. 5. — *Humectation verticale, sans plan d'eau*

Féodoroff (1965) a montré qu'après une phase initiale, la cote du front humide est proportionnelle au temps. Si $z$ est la cote du front, $z_0$ la cote atteinte au temps $t_0$, à partir duquel la vitesse du front $V_0$ est constante, on a : $z = z_0 + V_0\,(t - t_0)$. Nous avons retrouvé cette relation sur le sable que nous avons utilisé. L'alimentation en eau se fait par un tube effilé, fournissant l'eau goutte à goutte au centre du tube. Nous avons retrouvé, comme Féodoroff (*op. cit*), que les profils hydriques ont en général une humidité constante sauf au voisinage du front humide et à la partie supérieure du tube. Cette humidité qui varie entre 20 et 24 p. 100 correspond à l'occupation de 66 à 71 p. 100 de la porosité.

## 1. 6. — *Humectation horizontale*

1. 61. *Constatations expérimentales.*

On a suivi le déplacement du front humide dans un tube horizontal transparent alimenté en eau par l'un ou l'autre des dispositifs suivants :

— récipient humectant le sable par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté de porosité n° 1. L'eau du récipient est maintenue sous une légère succion (5 cm d'eau au-dessous de l'axe du tube) pour éviter l'intervention du poids de l'eau (fig. 7 *a*) ;

— tube coudé rempli de sable et plongeant dans un récipient à niveau constant (fig. 7 *b*).

L'abscisse $x$ du front humide, ainsi que la quantité d'eau consommée Q sont proportionnelles à $\sqrt{t}$, sauf au voisinage de l'origine. Les droites représentatives obtenues en portant $x$ ou Q en ordonnée et $\sqrt{t}$ en abscisse ne passent pas par l'origine (fig. 8). Ceci provient en partie du fait qu'avec le premier dispositif d'alimentation, l'instant initial est mal défini, le remplissage du récipient en arrière de la plaque de verre fritté n'étant pas instantané ; de ce fait, la base de la

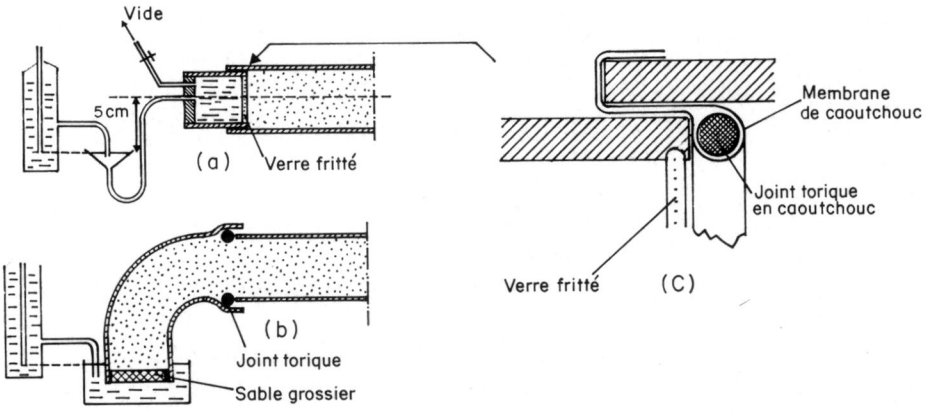



FIG. 7. — *Alimentation en eau dans le cas de l'humectation horizontale*
*a* : dispositif avec tube portant une plaque de verre fritté ;
*b* : dispositif avec tube coudé ;
*c* : détail du dispositif *a* : jonction entre le tube de sable et le tube portant la plaque de verre fritté.

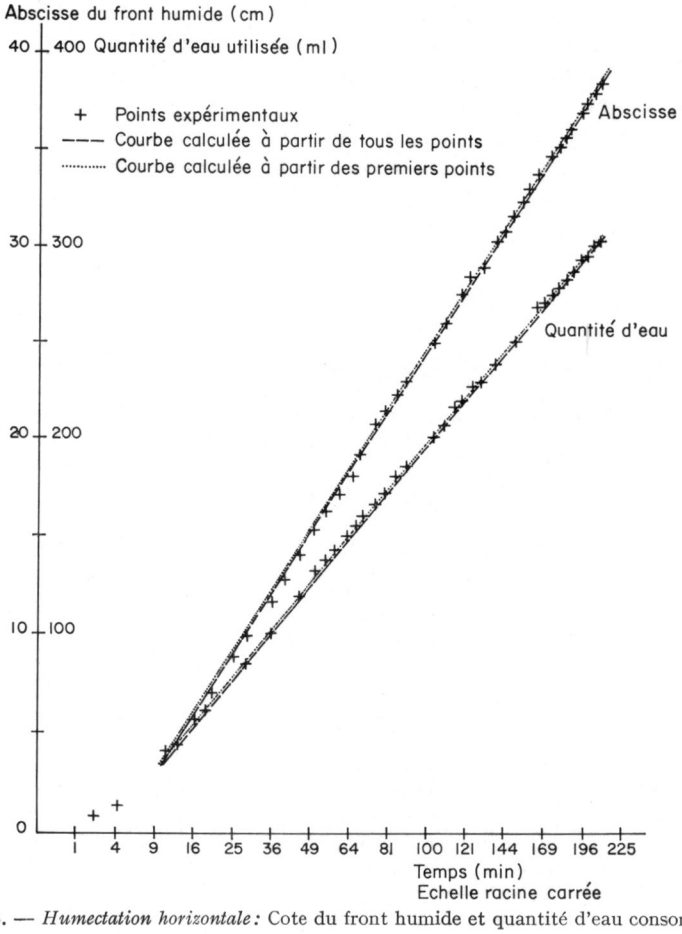



FIG. 8. — *Humectation horizontale :* Cote du front humide et quantité d'eau consommée

plaque, humectée la première, commence à transmettre de l'eau au sol, alors que le haut de la plaque est encore sec. Lorsqu'on utilise un tube coudé, il y a encore une erreur sur l'instant initial, et de plus le front humide n'est pas toujours dans un plan vertical à la sortie du tube coudé.

La forme linéaire des courbes $x = f(\sqrt{t})$ et $Q = g(\sqrt{t})$ se prêtera particulièrement bien à la mise en évidence des perturbations apportées par un élément grossier, et on pourra très facilement évaluer les paramètres de ces droites à partir des premiers points expérimentaux seulement (fig. 8).

Pour suivre l'évolution de l'humidité du sable au cours du temps, nous n'avons pu procéder à des mesures non destructrices (rayon $\gamma$ par exemple). Nous avons dû, de ce fait, doser l'humidité sur des tubes différents à des époques différentes. On a utilisé des tubes sciés en deux moitiés symétriques, suivant deux génératrices, puis reconstitués en maintenant les deux moitiés accolées par des colliers, du mastic assurant l'étanchéité. Nous avons brusquement arrêté l'alimentation en eau et enlevé le sable sec au-delà du front humide. Ceci permet de doser l'humidité tranche par tranche. La figure 9 représente les profils hydriques mesurés à deux époques différentes ; l'humidité décroît régulièrement lorsqu'on se déplace de la zone d'alimentation au front humide.

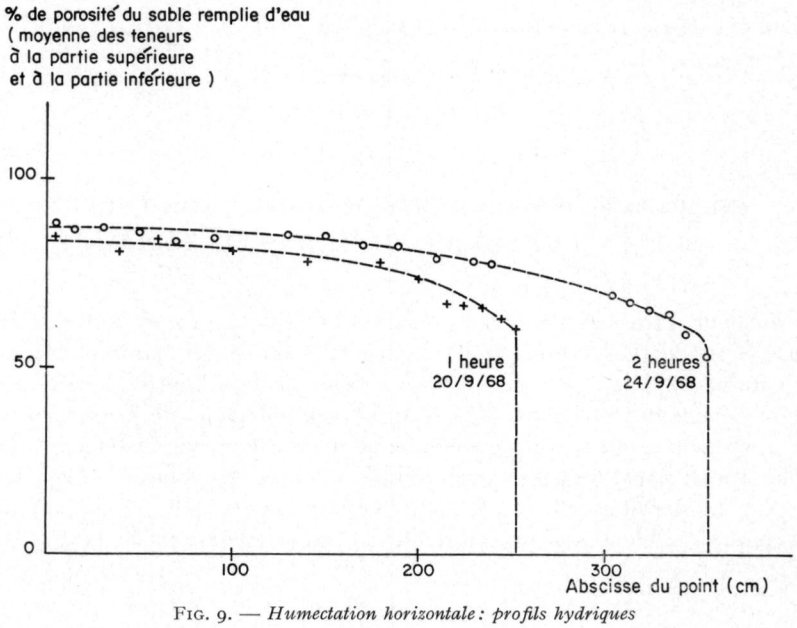



FIG. 9. — *Humectation horizontale : profils hydriques*

## 1. 62. *Loi d'avancement du front humide.*

Comme la loi théorique d'avancement du front nous sera utile par la suite, nous allons tenter de la retrouver en transposant à un filtre ce qui se passe dans un tube capillaire.

L'eau se déplace sous la seule influence de la pression capillaire :

$$D = \frac{\pi r^4}{8n} \frac{\psi}{x} \qquad D \to 0, \text{ si } x \to \infty$$

$$\pi r^2 \frac{dx}{dt} = \frac{\pi r^4}{8n} \frac{\psi}{x} \qquad \frac{dx}{dt} = \frac{r^2}{8n} \frac{\psi}{x} \qquad x \cdot dx = \frac{r^2}{8n} \psi \cdot dt$$

$$x^2/2 = (r^2/8\,n)\,\psi\,t$$

$$x = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\psi}{n}} \sqrt{t}$$

La transposition donne, pour le milieu poreux :

$$D = KS\,\psi/x$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{100\,K\,\psi}{Px} \qquad x = \sqrt{200\,K\,\psi/P}\,\sqrt{t}$$

Ici, la loi $x = f(t)$ étant relativement simple, on peut établir l'équation reliant la quantité d'eau cumulée Q au temps $t$

$$D = dQ/dt = KS\,\frac{\psi}{x} = \frac{KS\,\psi}{\sqrt{200\,K\,\psi/P}} \cdot t^{-\frac{1}{2}}$$

$$dQ = \left(KS\,\psi/\sqrt{200\,K\,\psi/P}\right) t^{-\frac{1}{2}} \cdot dt$$

$Q_0^t$ étant la quantité d'eau utilisée entre le temps o et $t$ :

$$Q_0^t = \left(2\,KS\,\psi/\sqrt{200\,K\,\psi/P}\right)\sqrt{t}$$

## II. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS NON POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DU SABLE

Les éléments grossiers non poreux étaient des volumes géométriques taillés dans du plastique rigide : 3 cylindres hauts de 11 cm et ayant des diamètres de 4, 3,7 et 2,7 cm et un parallélépipède à base carrée (côté = 2,6 cm) haut de 4 cm.

Chaque élément a été placé dans le tube plein de sable, de façon que son axe coïncide avec celui du tube. On s'est efforcé de réaliser le même tassement autour de l'élément en utilisant des pistons évidés en leur centre en fonction de la dimension de l'élément. La densité réelle des éléments variant entre 1,4 et 1,5, on pouvait s'attendre à ce que le sable ne soit pas anormalement tassé en dessous d'eux.

### 2. 1. — *Résultats*

#### 2. 11. *Filtration en tube vertical avec plan d'eau en surface.*

Ces manipulations ont été effectuées soit avec des tubes courts humectés avec précaution par le bas, soit avec des tubes longs humectés par le haut (cf. section 1. 3).

Les quantités d'eau recueillies à la base des tubes ont été pesées, afin de construire les courbes des quantités d'eau cumulées en fonction du temps.

La reproductibilité de ces quantités d'eau, très convenable pour les tubes témoins (cf. section 1.3), devient franchement mauvaise lorsque les tubes contiennent un élément grossier (fig. 10) ; des phénomènes perturbateurs paraissent intervenir de façon aléatoire.

Malgré tout, on constate que la présence d'un élément grossier au sein du sable diminue en général la quantité d'eau transmise par le filtre ainsi constitué. Cette réduction de la quantité d'eau percolée est plus accentuée pour les tubes courts que pour les tubes longs.

Pour relier la diminution de débit à la section des éléments grossiers de même longueur, on examine s'il y a un parallélisme entre le classement par ordre croissant des débits des divers tubes et le classement par ordre décroissant des diamètres des éléments grossiers correspondants. Désignons par $C_1$ le cylindre de petit diamètre,

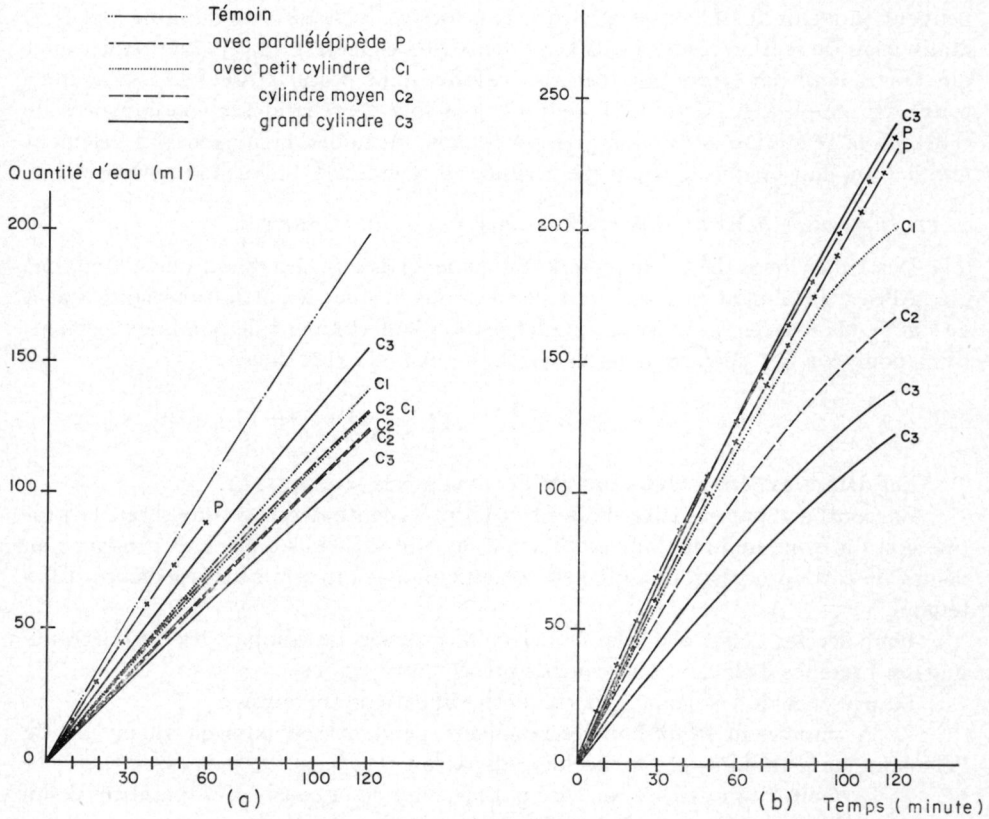



FIG. 10. — *Effet des éléments grossiers non poreux sur la filtration*
*a* : tubes longs
*b* : tubes courts

$C_2$ celui de diamètre intermédiaire et $C_3$ celui de grand diamètre, et par T le témoin (élément de diamètre nul), et rangeons les débits par ordre croissant. On obtient les séquences :

$C_3\ C_2\ C_2\ C_1\ C_2\ C_1\ T\ T$ pour les tubes longs
$+\ +\ +\ +\ -\ +\ +\ +$

$C_3\ C_3\ C_2\ C_1\ C_3\ T\ T$ pour les tubes courts
$+\ +\ +\ +\ -\ +\ +$

En faisant l'hypothèse que la diminution de débit est d'autant plus accentuée que la section de l'élément grossier est plus grande, on aurait un ordre idéal $C_3\ C_2\ C_1\ T$. Si l'on affecte le signe + à l'objet classé conformément à l'hypothèse ci-dessus et — dans le cas contraire, on constate que le classement est assez mauvais : pour les tubes

longs, 1 cas aberrant sur 8 (12 p. 100), pour les tubes courts : 1 cas aberrant sur 7 (14 p. 100).

La forte dispersion des résultats provient vraisemblablement des difficultés considérables que présente la réalisation d'un tassement homogène du sable, en présence d'un élément grossier. Dans ces conditions, les différences de débit constatées peuvent provenir aussi bien de modifications locales de la porosité du sable que de la diminution de section résultant de la présence de l'élément grossier. Le premier effet que l'on n'avait pas l'intention d'étudier résulte d'une perturbation de tassement au cours du remplissage. Comme il n'est pas possible de séparer ses conséquences de celles de la réduction de section provoquée dans un milieu homogène par l'élément grossier, on doit opérer de façon très soignée en rejetant les tubes mal remplis.

2. 12. *Infiltration dans un tube vertical avec plan d'eau en surface.*

Des tubes longs de 52 cm, comportant une épaisseur de sable fin de 48 cm, ont été utilisés. L'élément grossier était placé de façon que sa partie supérieure soit à 20 cm de la surface. Il s'agissait en effet d'avoir suffisamment de points expérimentaux pour évaluer correctement la constante A de l'expression :

$$z + (\psi + a)\ \mathrm{Log}\left[1 + \left(\frac{z}{\psi + a}\right)\right] = \mathrm{A}t.$$

Les détails expérimentaux ont été décrits dans la section 1. 31.

La courbe représentative de la fonction précédente décrit ce que serait la progression du front humide dans ce tube s'il ne contenait pas d'élément grossier ; on déduit de cette progression la quantité d'eau cumulée qui serait utilisée dans ce tube témoin.

Pour déceler l'effet éventuel de l'élément grossier, on compare les courbes obtenues en présence d'élément aux courbes précédentes (fig. 11).

La présence de l'élément apporte les modifications suivantes :

— la vitesse du front humide augmente pendant son passage au niveau de l'élément, puis diminue une fois celui-ci dépassé ;

— le débit d'eau utilisée (mesuré par la pente de la courbe des quantités d'eau cumulées) diminue dès que le front humide parvient au niveau de l'élément.

Les comportements précédents se retrouvent à peu près dans tous les cas (l'augmentation de vitesse du front humide n'est pas visible avec le parallélépipède, certainement à cause de sa faible section) ; mais l'importance des modifications ne suit pas de lois simples, certainement parce que des effets parasites se superposent aux effets étudiés, comme dans la phase de filtration qui suit l'infiltration ; toutes les remarques faites pour la filtration à la section 2. 11 sont donc encore valables ici.

2. 13. *Humectation verticale sans plan d'eau en surface.*

Les expériences ont été conduites dans des tubes cylindriques transparents de diamètre intérieur 5 cm. On a placé, au sein du sable qui les remplissait, un élément grossier non poreux ayant une section carrée ou circulaire constante.

L'alimentation en eau du tube se faisait au goutte à goutte, sans établissement d'un plan d'eau en surface. La quantité d'eau apportée était de 48 ml par heure (ce qui correspond à une lame d'eau de 20 mm par heure). Les débits n'étaient pas rigoureusement les mêmes pour chaque manipulation, les valeurs extrêmes étant 46 et 50.

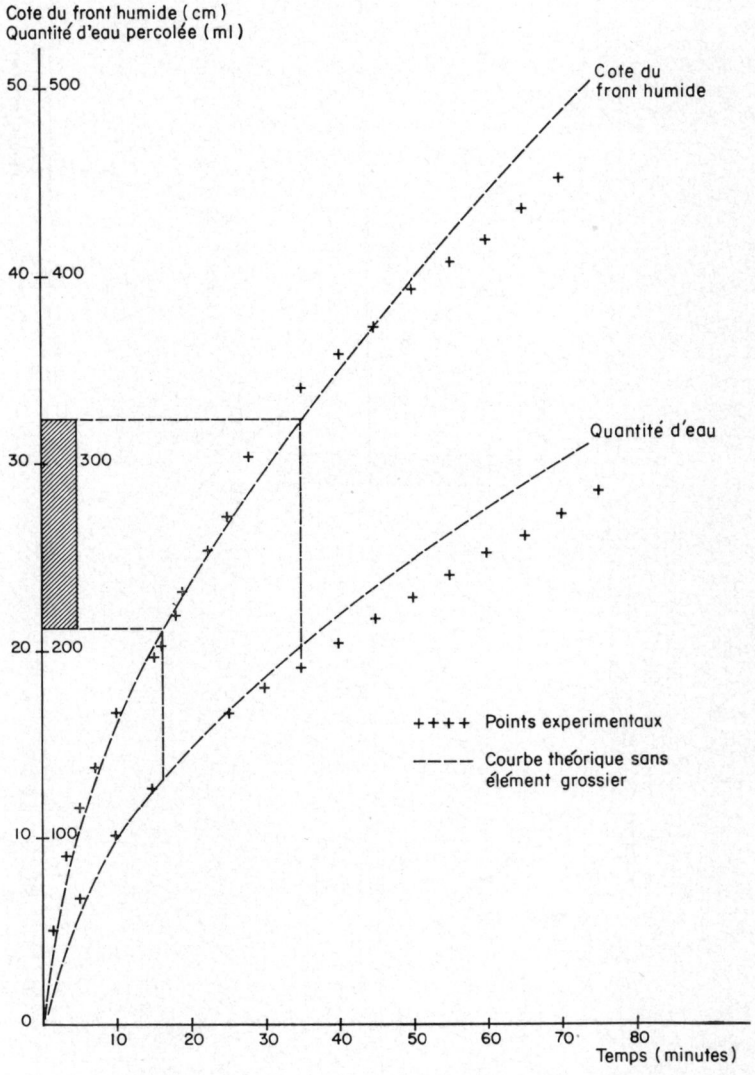



FIG. 11. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration avec plan d'eau*
Cylindre haut de 11 cm, surface de section : 12,7 cm²

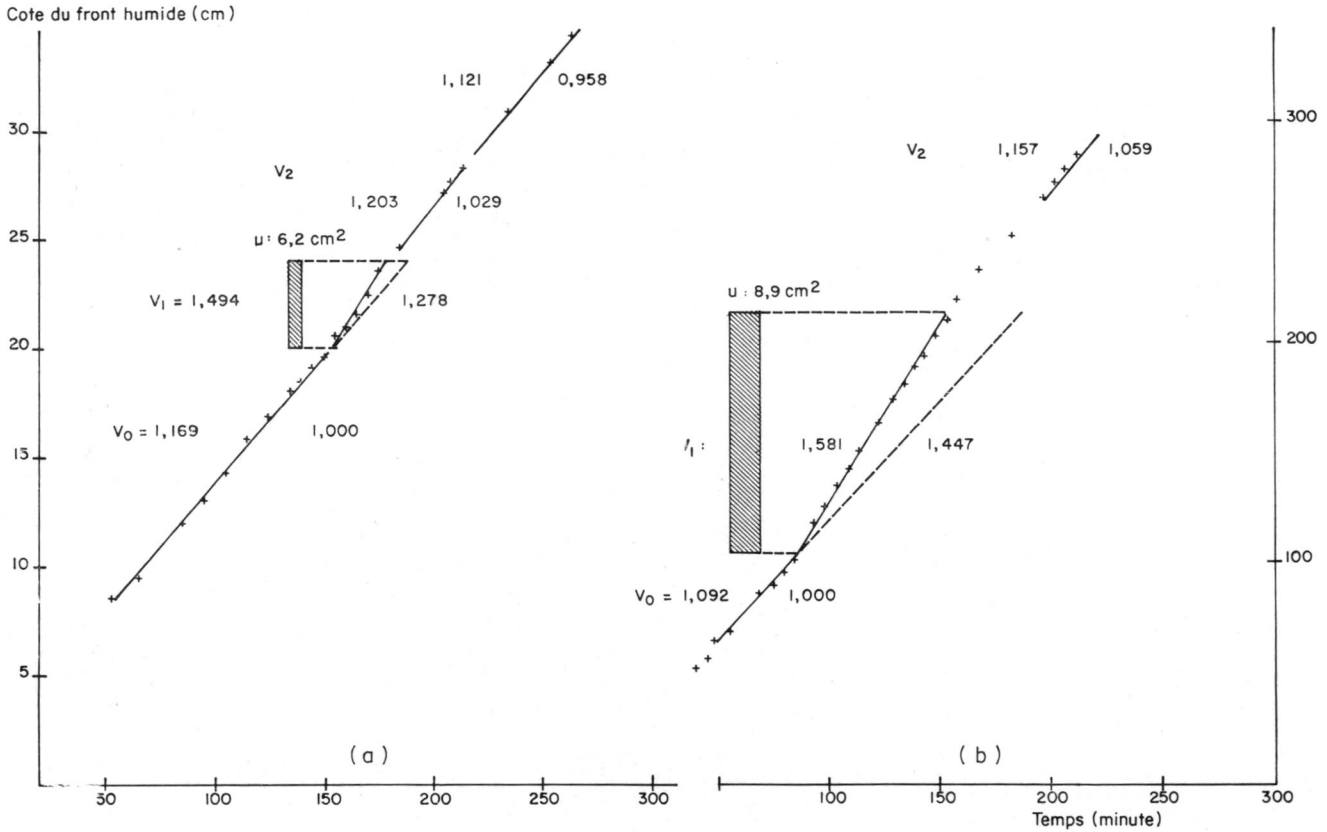



FIG. 12. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

*a* : parallélépipède à base carrée, hauteur 4 cm, section 5,2 cm²
*b* : cylindre, hauteur 11 cm, section 12,7 cm²

Au cours d'une manipulation, la fluctuation du débit restait inférieure à 4 p. 100. La descente du front humide a été suivie en fonction du temps.

Les graphiques cote du front humide temps (fig. 12) ont sensiblement la même allure. Après une phase d'établissement, le front humide se déplace proportionnellement au temps et donc avec une vitesse $V_0$ constante. Lorsqu'il passe au niveau de l'élément grossier, le front humide avance à une autre vitesse $V_1$ constante et supérieure à $V_0$.

Une fois l'élément rigide dépassé, la vitesse du front humide diminue en général, puis reprend au bout d'un certain temps une vitesse $V_2$ souvent voisine de $V_0$. Cette diminution temporaire de vitesse du front s'explique par le fait qu'une partie de l'eau doit humecter, en plus du volume de sable à la périphérie de l'élément grossier, le sable se trouvant sous celui-ci. La figure 13 montre l'allure du front humide observée à travers une paroi de plexiglas.

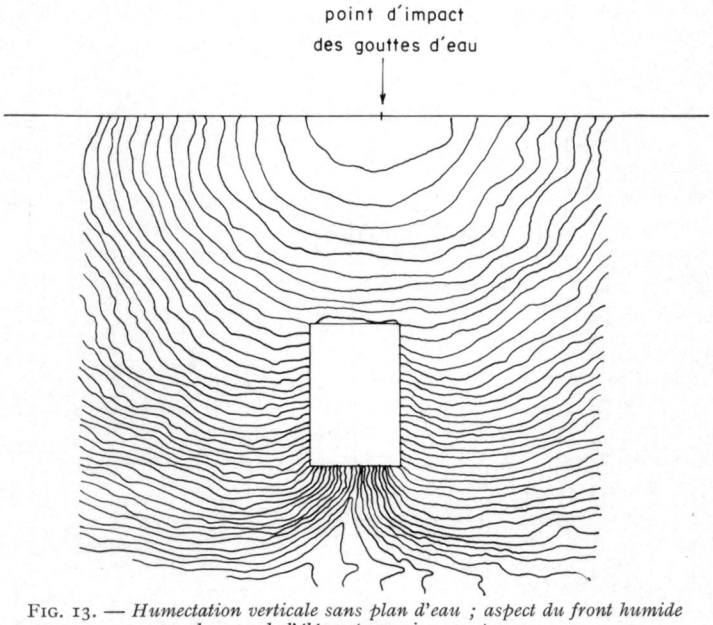



FIG. 13. — *Humectation verticale sans plan d'eau ; aspect du front humide au-dessous de l'élément grossier non poreux*

Les points représentant la position du front humide en fonction du temps se placent sensiblement sur des segments de droite ; nous avons donc calculé les vitesses $V_0$, $V_1$, $V_2$ par ajustement linéaire au moyen de la méthode des moindres carrés. Sur les graphiques, nous donnons, à gauche de chaque segment, la valeur de la vitesse ainsi calculée et, à droite, l'indice correspondant obtenu en faisant $V_0 = 1$ dans tous les cas.

2. 14. *Humectation horizontale.*

La présence d'un élément grossier dans le sable a des conséquences sur le déplacement du front humide et la quantité d'eau cumulée consommée et ceci, quel que soit le mode d'alimentation en eau (par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté

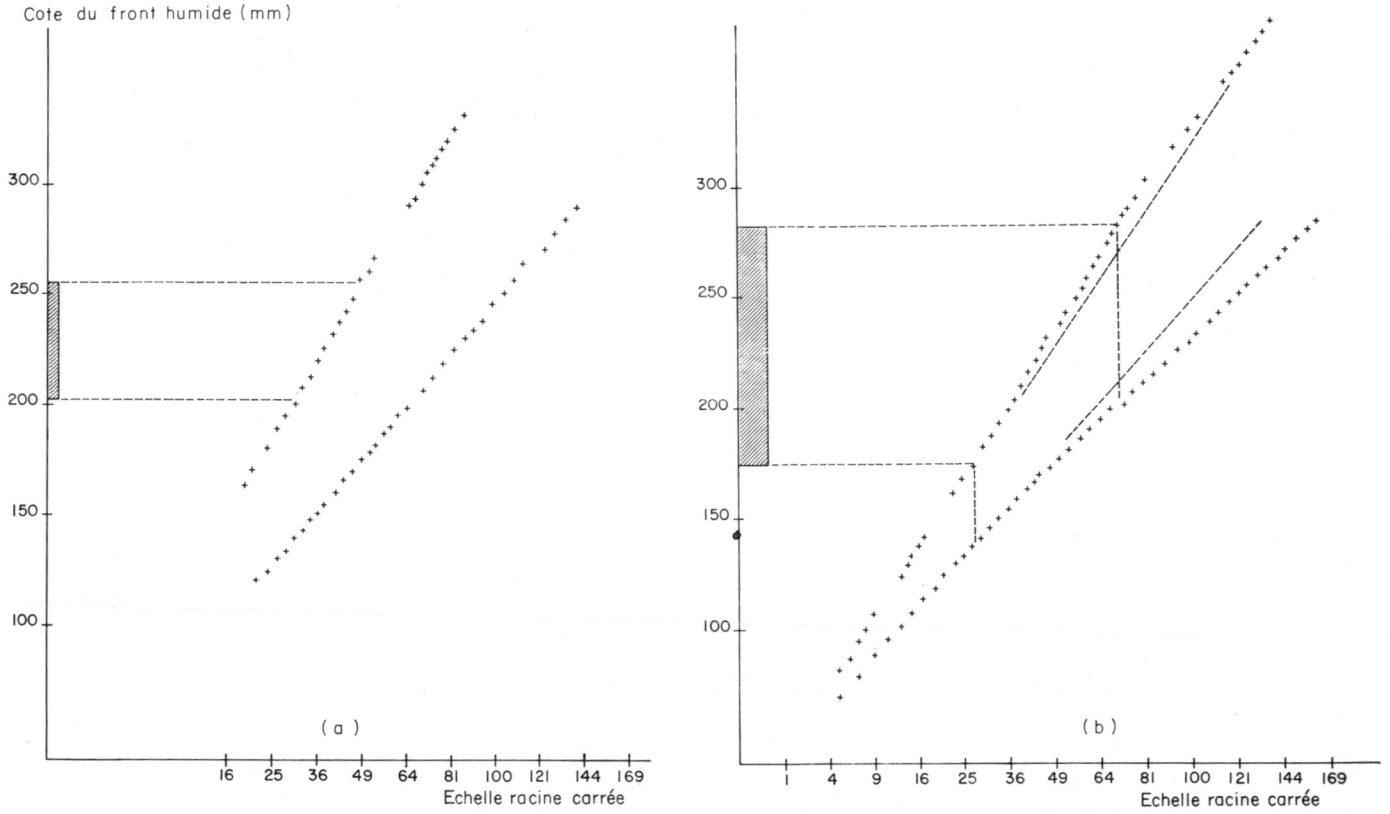



FIG. 14. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation horizontale*

*a* : parallélépipède à base carrée, hauteur 5,2 cm, section 4 cm²
*b* : cylindre, hauteur 11 cm, section 5,2 cm²

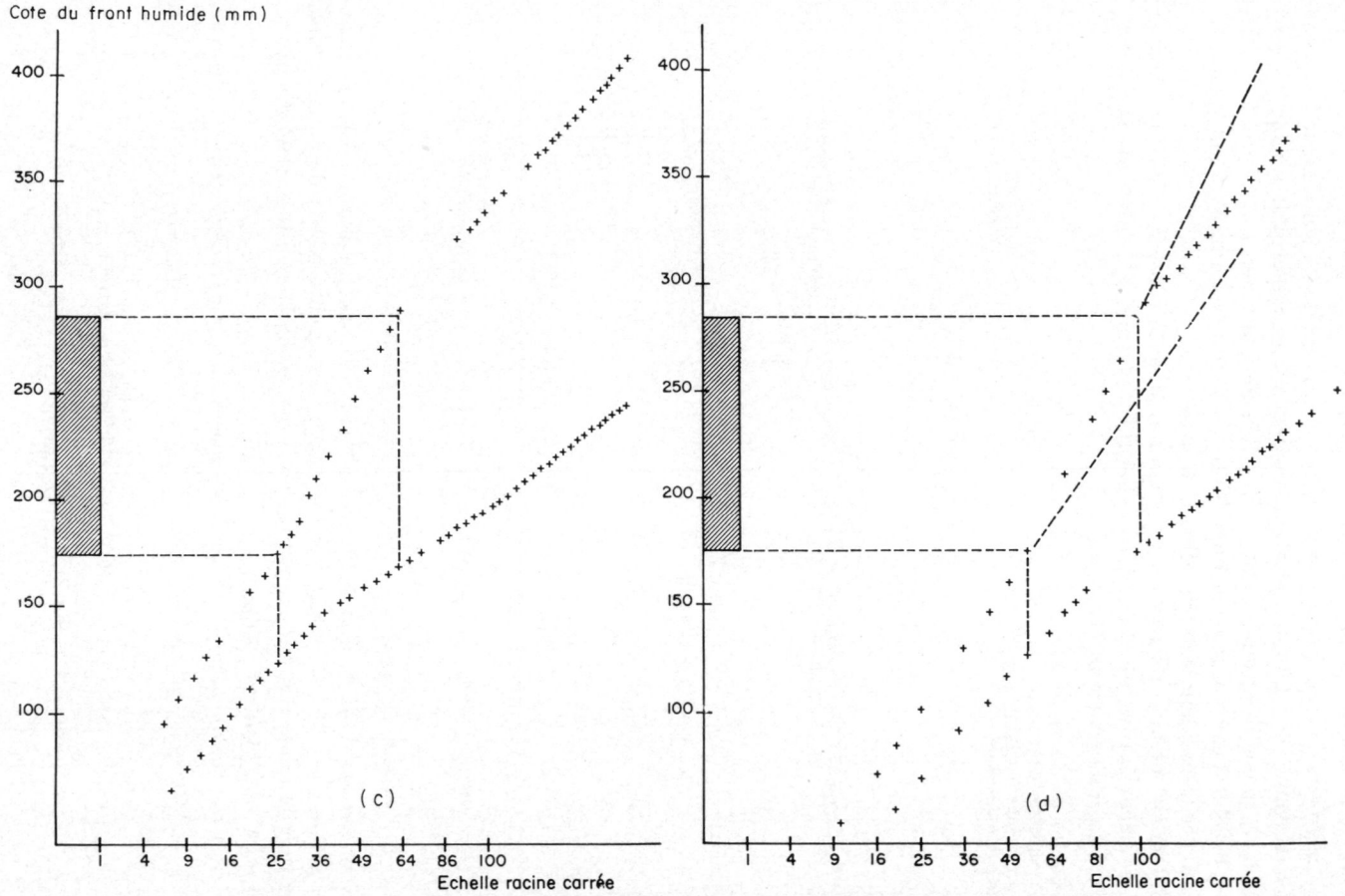



FIG. 14. — *Influence d'élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale*
*c* : cylindre, hauteur 11 cm, section 12,7 cm²
*d* : cylindre, hauteur 11 cm, section 12,7 cm², alimentation par tube coudé.

ou d'un tube coudé plein de sable). L'examen des graphiques « abscisse du front — racine carrée du temps » permet de le constater facilement (fig. 14) :

— la vitesse du front humide est plus élevée tant qu'il est au niveau de l'élément grossier. Ensuite, elle diminue, le ralentissement étant appréciable quelques centimètres après que le front humide ait dépassé l'élément grossier ;

— le débit d'eau consommée diminue lorsque le front humide a atteint l'élément, et augmente légèrement une fois celui-ci dépassé.

Si l'on considère la répartition de l'humidité dans le tube, il semble que celle-ci soit légèrement supérieure au niveau de l'élément, ce qui se traduit par une déformation des profils hydriques (fig. 15).

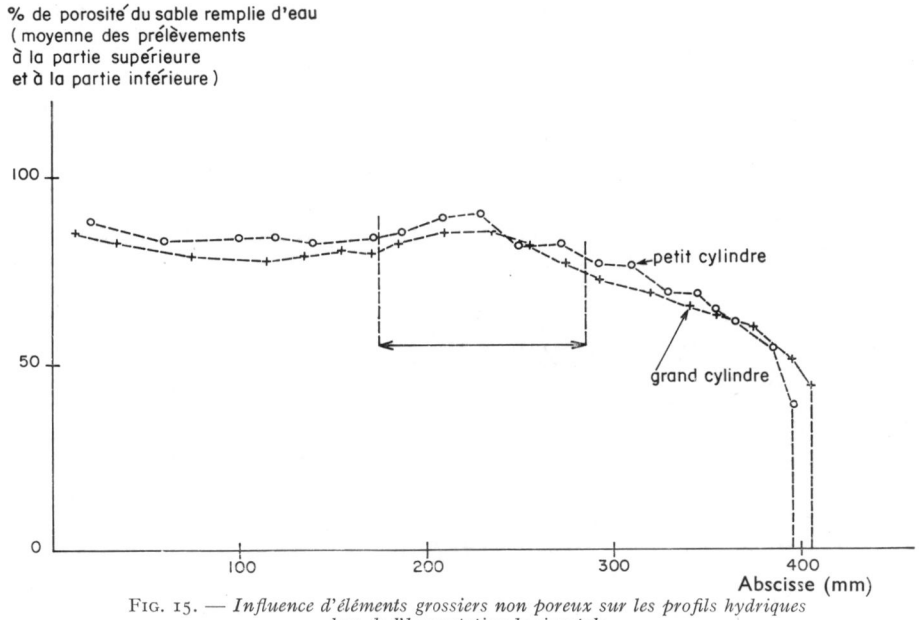



FIG. 15. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur les profils hydriques lors de l'humectation horizontale*

### 2. 2. — *Essai d'explication. Composition des résistances hydrauliques*

Nous venons de mettre en évidence les modifications apportées à l'écoulement de l'eau dans un sable par la présence de matériaux rigides. Nous allons tenter une explication générale des faits constatés en considérant la résistance offerte par le milieu à l'avancement du fluide.

A cet effet, nous utilisons l'analogie déjà signalée entre la loi d'Ohm et la loi de Darcy : Posons :

| Pour la loi d'Ohm : | Pour la loi de Darcy : |
|---|---|
| $i$ = intensité du courant | D = débit |
| $q$ = quantité d'électricité | Q = quantité d'eau |
| R = résistance électrique | |
| U = différence de potentiel | $h$ = charge hydraulique |
| $s$ = section, $l$ = longueur, $\sigma$ = conductivité } du conducteur | S = section, $l$ = longueur } du filtre, K = coefficient de Darcy |
| $\rho$ = résistivité = $1/\sigma$ | |

$t$ = temps

Rappelons d'abord que l'intensité du courant dans un conducteur et le débit d'eau à travers un filtre dépendent respectivement du potentiel électrique $U/l$ et du potentiel hydraulique $h/l$ :

La loi d'Ohm s'écrit :

$i = dq/dt = U/R = (\sigma\, s)\ (U/l)$, formulation analogue à la loi de Darcy $D = dQ/dt = KS\ (h/l)$.

Écrivons la loi de Darcy de façon analogue à $i = U/R$ : $D = dQ/dt = h/(l/KS)$, ou, en posant $j = l/KS : D = h/j$. Nous appelons $j$ la *résistance hydraulique*.

Comme la loi de Darcy est homologue de la loi d'Ohm, des calculs analogues permettent de composer les résistances hydrauliques ou les résistances électriques.

2. 21. *Filtration.*

Nous allons d'abord établir la formule permettant de calculer la perméabilité du filtre contenant un élément grossier non poreux de hauteur $l_2$ et de section transversale constante $u$. Le filtre de section S et de longueur $l$ est rempli d'un matériau de perméabilité $K_1$ (fig. 16).

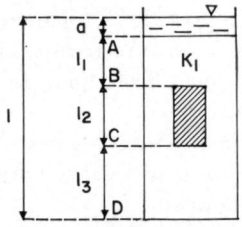



FIG. 16. — *Calcul de la résistance hydraulique d'un filtre contenant un élément grossier non poreux*

On peut trouver la perméabilité $Kg$ du filtre, en écrivant que les pertes de charge s'additionnent (comme les différences de potentiel) le long du filtre :

$$H = h_1 + h_2 + h_3$$

Comme $D = K_1 S h_1/l_1 = K_1 (S - u)\ h_2/l_2 = K_1 S h_3/l_3$,

on a $h_1 = D l_1/K_1 S$, $h_2 = D l_2/K_1 (S - u)$, $h_3 = D l_3/K_1 S$

$H = D l_1/K_1 S + D l_2/K_1 (S - u) + D l_3/K_1 S$

$D = K_1 SH/\ (l_1 + l_2 S/\ (S - u) + l_3)$

En identifiant cette expression avec le débit du filtre complexe de perméabilité $K_g$ : $D = K_g\, SH\ (l_1 + l_2 + l_3)$, on obtient :

$$K_g = \frac{l_1 + l_2\, S/\ (S - u) + l_3}{K_1\ (l_1 + l_2 + l_3)}$$

On trouve le même résultat en considérant la résistance hydraulique globale $J_g$ du filtre :

$$J_g = J_1 + J_2 + J_3$$

La résistance $J_2$ s'obtient en composant en parallèle les résistances dues au sable et à l'élément grossier :

$$\frac{1}{J_2} = \frac{1}{l_2/K_1 \cdot (S - u)} + \frac{1}{l_2/o \cdot u}$$

$$J_2 = l_2/K_1\ (S - u)$$

$$J_g = l_1/K_1 S + l_2/K_1\ (S - u) + l_3/K_1 S$$

Le coefficient de perméabilité global $K_g$ du filtre complexe s'obtiendrait en identifiant les deux membres de l'expression, après avoir posé

$$J_g = \frac{l}{K_g S}$$

Dorénavant, nous composerons directement les résistances hydrauliques, ce qui simplifiera les calculs et les raisonnements.

On retrouve sur l'expression de $K_g$ que :

— lorsque l'élément rigide occupe toute la section du tube : $u = S$ donne $K_g = 0$, la perméabilité globale est nulle ;

— lorsqu'il n'y a pas d'élément rigide, la perméabilité est celle du filtre normal. $u = 0$ donne $K_g = K_1$. La perméabilité est bien celle du filtre sans cailloux.

De ce fait, la fonction $K_g(u)$ étant monotone dans l'intervalle oS, la présence de l'élément rigide non poreux diminue la perméabilité, comme il fallait s'y attendre. On retrouve donc bien qualitativement les constatations expérimentales.

Dans l'expression de $J_g$, le terme $l_2/K_1\ (S - u)$ montre que l'élément grossier intervient par la diminution de section qu'il provoque et par sa longueur $l_2$. Pour une section donnée de l'élément grossier, celui-ci aura d'autant moins d'effet sur la perméabilité du filtre que le rapport de la longueur de l'élément à la longueur du filtre sera plus petit. On retrouve donc bien aussi cette constatation expérimentale : la présence d'un élément grossier affecte plus la perméabilité globale des tubes courts que celle des tubes longs.

Nous allons examiner maintenant dans quelle mesure l'application du mode de calcul des résistances hydrauliques équivalentes précédemment présenté permet de rendre compte des différences de débit.

Les débits étant respectivement pour le tube témoin et le tube avec élément $D_1$ et $D_2$, on compare le rapport mesuré $(D_1/D_2)_m$ au rapport calculé avec la théorie précédente $(D_1/D_2)_c$.

Comme en fait ces tubes constituent des filtres complexes à cause du sable grossier de la base, on va examiner préalablement si on peut réaliser un calcul simplifié en négligeant la couche de sable grossier. Avec les notations précédemment définies dans les figures 3 et 16 :

$$D_1 = \frac{h + l'}{(1/SK_1)(l_1 + l_2 + l_3) + l'/SK'}$$

$$D_2 = \frac{h + l'}{(1/K_1)(l_1/S + l_2/(S - u) + l_2/S) + l'/SK'}$$

Le rapport $(D_1/D_2)c$ peut s'écrire :

$$(D_1/D_2)c = \frac{S\,(l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S)\,(1 + \varepsilon)}{(l_1 + l_2 + l_3)\,(1 + \varepsilon')}$$

$$\text{avec } \varepsilon = \frac{l'K_1}{K'\,(l_1 + l_2S/(S - u) + l_3)} \qquad \text{et} \qquad \varepsilon' = \frac{l'SK_1}{K'\,(l_1 + l_2 + l_3)}$$

Le rapport simplifié R s'obtient en faisant $l' = 0$ dans l'expression de $(D_1/D_2)c$, ce qui entraîne $\varepsilon = \varepsilon' = 0$

$$(D_1/D_2)c = R\,\frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon'}$$

Pour évaluer l'erreur maxima commise en négligeant $\varepsilon$ et $\varepsilon'$, nous nous plaçons dans le cas le plus défavorable :

Tubes courts : $l'/(l_1 + l_2 + l_3)$ est le plus grand, cylindre non poreux de petit diamètre : $(S - u)$ sera grand.

Avec : $K_1 = 0{,}07$ cm/mn $\quad K' = 15$ cm/mn

$l_1 = 4$ cm $\quad l_2 = 11$ cm $\quad l_3 = 5$ cm

$S = 21{,}5$ cm² $\quad u = 6$ cm² $\quad S - u = 15{,}5$ cm²

$\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ et $\varepsilon' = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$

$(1 + \varepsilon)/(1 + \varepsilon') \# 1 + \varepsilon - \varepsilon' \# 1 - 10^{-3}$

L'erreur introduite en négligeant « $l'$ » étant très largement inférieure à la précision obtenue sur le rapport R simplifié (4,3 et 3,5 p. 100 selon que le tube est long ou court = annexe 5), on conservera l'expression simplifiée que nous désignerons par $(D_1/D_2)_c$.

On a porté sur un graphique, en abscisse $(D_1/D_2)_c$ et en ordonnée $(D_1/D_2)_m$ (fig. 17). La première bissectrice est le lieu des points pour lesquels les variations de débit induites par les éléments grossiers sont égales à celles qui sont expliquées par le calcul des résistances hydrauliques.

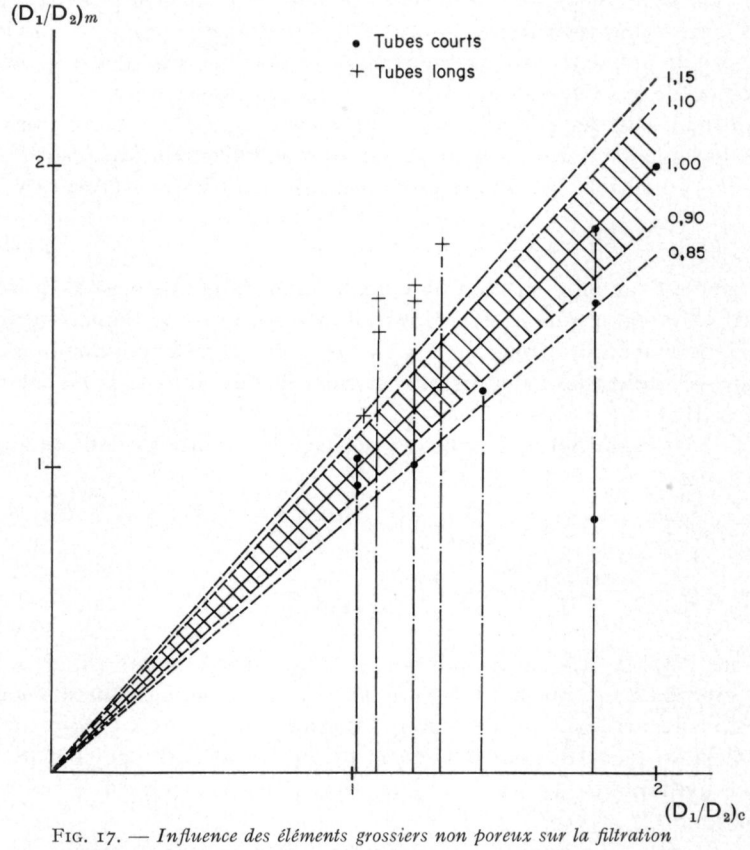



FIG. 17. — *Influence des éléments grossiers non poreux sur la filtration*

Comparaisons entre les rapports de débits mesurés $(D_1/D_2)_m$ et calculés en utilisant la composition des résistances hydrauliques $(D_1/D_2)_c$

$D_1$ = débit du tube témoin

$D_2$ = débit du tube contenant un élément grossier

On constate ceci :

— pour les tubes courts humectés avec précaution par le bas, les points sont situés au-dessous de la bissectrice : le calcul surestime la valeur du rapport. En présence d'élément grossier, le débit réel est supérieur au débit calculé ;

— pour les tubes longs, humectés par le haut. c'est l'inverse qui se produit. La diminution de débit est plus forte que celle prévue.

Pour juger de la position des points par rapport à la première bissectrice, on considère les secteurs limités par les droites passant par l'origine de pente 0,85-1,15 et 0,9-1,1.

Dans le secteur 0,85-1,15, on trouve 25 p. 100 des tubes longs et 42 p. 100 des tubes courts. On retrouve les différences déjà signalées entre tubes longs et tubes courts (Section 2. 11). On peut avancer des explications à cet état de fait. Rappelons d'abord qu'il est plus facile de mettre en évidence l'effet d'un élément grossier sur l'infiltration pour un tube court que pour un tube long. La présence d'un élément grossier peut favoriser l'emprisonnement d'air définitif en limitant la section par laquelle l'air peut s'échapper ; cet emprisonnement peut être plus important pour les tubes longs humectés sans précaution. Ces hypothèses n'expliquent pas les mesures aberrantes qui proviennent certainement des difficultés que l'on a pour tasser de façon homogène le sable au voisinage de l'élément grossier.

En conclusion, les perturbations apportées par l'élément grossier, tant à la porosité du sable placé à son voisinage, qu'au remplissage du filtre par l'eau, ne permettent pas de vérifier la validité de l'explication par les résistances hydrauliques.

2. 22. *Infiltration verticale avec plan d'eau.*

Le tube est rempli d'un matériau meuble dont la porosité est P (p. 100 volume apparent) et la perméabilité $K_1$. Nous allons considérer le déplacement du front humide dans chacun des tronçons AB, BC et CD (fig. 16), en désignant par $z_1$, $z_2$, $z_3$ ses cotes dans ces différents tronçons ; les origines de ces cotes se trouvent respectivement en A, B et C.

Dans le tronçon AB de longueur $l_1$ et avec les notations définies au début du chapitre, on a :

$$D = \frac{PS}{100}\, dz_1/dt = KS\left(\frac{\psi + a + z_1}{z_1}\right)$$

$$S dz_1/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + z_1}{z_1/K_1 S}$$

On ne simplifie pas par S pour conserver au dénominateur du 2e membre *l'expression complète de la résistance hydraulique*. A partir de maintenant, nous écrirons les équations caractéristiques de chaque situation sous la forme précédente.

Au-delà du point B, pour le tronçon BC, la section utile devient (S — $u$) et la résistance hydraulique $J_2$ est la somme de celle du tronçon AB et du tronçon de longueur $z_2$.

$$(S - u)\, dz_2/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{l_1/K_1 S + z_2/K_1 (S - u)}$$

$$dz_2/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{l_1 (S - u)/K_1 S + z_2/K_1}$$

Pour le tronçon CD, on obtient par un raisonnement analogue :

$$dz_3/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + l_2 + z_3}{l_1/K_1 + l_2 S/K_1 (S - u) + z_3/K_1}$$

On retrouve la vitesse du front humide en l'absence d'obstacle, en écrivant que $u = 0$ dans les deux dernières expressions.

Lorsque le front humide est au niveau de l'élément rigide, il y a accélération par rapport au témoin sans élément, car la résistance hydraulique en présence d'élément : $l_1 (S - u)/K_1 S + z_2/K_1$ est plus petite que lorsqu'il n'y a pas d'élément : $l_1/K_1 + z_2/K_1$ puisque $(S - u)/S < 1$.

Par contre, après avoir dépassé l'élément, le front humide marque un ralentissement par rapport au tube sans élément. En effet, avec élément, la résistance hydraulique : $l_1/K_1 + l_2 S/K_1 (S - u) + z_3/K_1$,

est supérieure à ce qu'elle était sans élément :

$$l_1/K_1 + l_2/K_1 + z_3/K_1, \text{ puisque } S/(S - u) > 1.$$

Pour obtenir la loi $z = f(t)$, on intégrera les équations différentielles précédentes dans les intervalles BC et CD seulement, la solution étant déjà connue pour l'intervalle AB.

Ces équations étant analogues, on pose :

Pour l'intervalle BC :

$$\begin{aligned} A &= \overline{\psi} + a + l_1 \\ B &= l_1 (S - u)/K_1 S \\ C &= l/K_1 \end{aligned}$$

Pour l'intervalle CD :

$$\begin{aligned} A &= \overline{\psi} + a + l_1 + l_2 \\ B &= l_1/K_1 + l_2 S/K_1 (S - u) \end{aligned}$$

L'équation prend alors la forme générale :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{100}{P} \cdot \frac{A + z}{B + Cz} \qquad \frac{(B + Cz)\, dz}{A + z} = \frac{100}{P}\, dt$$

$$\frac{B + Cz}{A + z} = \frac{B}{A + z} + \frac{C\ z}{A + z} = \frac{B}{A + z} + \frac{C(A + z - A)}{A + z} = \frac{B}{A + z} + C - \frac{AC}{A + z}$$

Sous cette forme, l'expression peut être facilement intégrée. La valeur de la constante d'intégration est déterminée en écrivant que pour $t = 0$, $z = 0$.

En définitive, on obtient :

— pour le tronçon BC :

$$z_2 + \left[\frac{l_1 (S - u)}{S} - (\psi + a + l_1)\right] \text{Log } \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{\psi + a + l_1} = \frac{100\ K_1}{P}\ t$$

— pour le tronçon CD :

$$z_3 + \left[l_1 + \frac{l_2 S}{S - u} - (\psi + a + l_1 + l_2)\right] \text{Log } \frac{\psi + a + l_1 + l_2 + z_3}{\psi + a + l_1 + l_2} = \frac{100}{P}\ K_1 t$$

Nous avons signalé, dans la section 2. 21, que les difficultés expérimentales compliquaient la mise en évidence de l'effet des éléments grossiers sur la filtration. En particulier, on a constaté que le calcul des résistances hydrauliques ne donnait un accord convenable entre la réalité et l'expérience que pour certains tubes, ce qui constitue un indice de bonnes conditions expérimentales. C'est sur ceux-ci que nous tenterons d'expliquer les modifications de la courbe $z = f(t)$ relative à l'infiltration.

La constante $A = [z - 71 \log (1 + z/71)]\ t^{-1}$ s'évalue à partir des points expérimentaux obtenus avant que le front humide n'ait atteint l'élément grossier ; aussi avons-nous utilisé seulement les résultats des tubes longs, qui permettent, en plaçant

l'élément rigide plus bas, d'avoir plus de points expérimentaux pour le calcul de A.

Nous présentons donc ici les résultats concernant deux tubes longs pour lesquels l'accord entre la théorie et l'expérience est convenable en percolation.

Sur la figure 18, on constate un accord très satisfaisant entre les cotes mesurées et calculées. Pour le même tube, l'accord est excellent entre les débits mesurés et calculés. Ces constatations montrent que le calcul de la résistance équivalente permet de rendre compte de l'effet des éléments grossiers d'une façon quantitative. Sur la figure 19, on constate que l'accord est déjà moins bon, ce qui correspond également au fait que, pour cette expérience, les débits prévus en filtration ne sont pas très proches des débits réels.

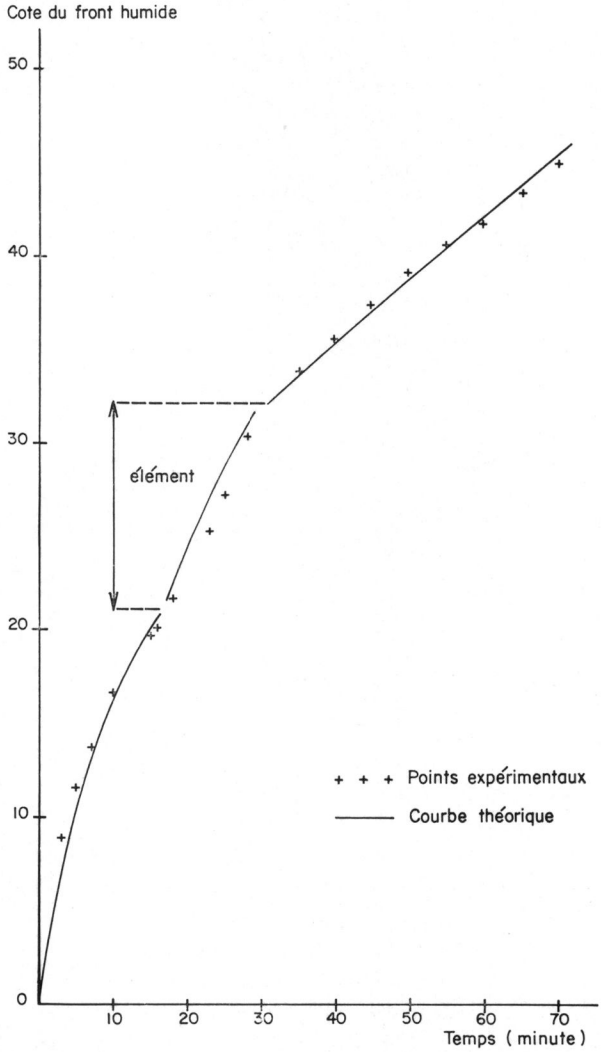



FIG. 18. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration*

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition des résistances hydrauliques ; cylindre, hauteur 11 cm et 12,7 cm² de surface de section.

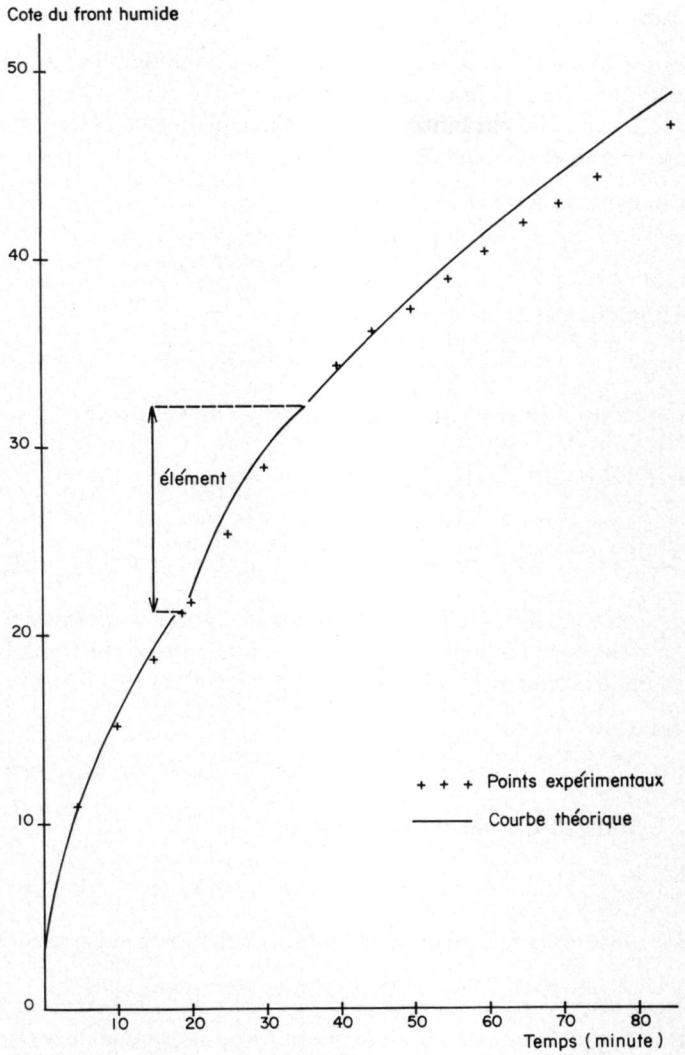



FIG. 19. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration*

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition des résistances hydrauliques ; cylindre, hauteur 11 cm et 10,7 cm² de surface de section.

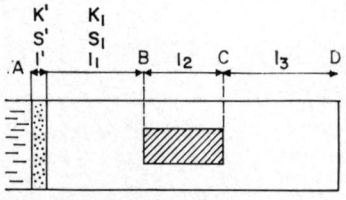



FIG. 20. — *Calcul de la formule de déplacement du front humide en humectation horizontale : alimentation par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté*

2. 23. *Humectation horizontale.*

Les formules donnant l'abscisse du front humide $x$ en fonction du temps $t$ seront établies dans les deux cas d'alimentation en eau.

Lorsque celle-ci se fait par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté de perméabilité K', de section S' et de longueur $l'$ (fig. 20), on a :

— pour le tronçon AB :

$$S(dx_1/dt) = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'/K'S' + x_1/K_1S}$$

Après séparation des variables et intégration :

$$2x_1\ (l'K_1/K') + x_1^2 = (200\ K_1\ \psi/P)t$$

— pour le tronçon BC correspondant au niveau de l'élément :

$$(S - u)(dx_2/dt) = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'/K'S' + l_1/K_1S + x_2/K_1(S - u)}$$

$$dx_2/dt = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'\ (S - u)/K'S' + l_1(S - u)/K_1S + x_2/K_1}$$

En comparant cette vitesse à celle qui existerait en l'absence d'élément (obtenue en faisant $u = 0$ dans l'expression), on constate que la vitesse du front humide augmente au niveau de l'élément, puisque $(S - u)/S' < S/S'$ et $(S - u)/S < 1$.

Par intégration, on obtient :

$$2x_2\ (K_1\ l'\ (S - u)/K'S' + l_1\ (S - u)/S) + x_2^2 = (200\ K_1\ \psi/P)t$$

— pour le tronçon CD, on aurait de même :

$$S(dx_3/dt) = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'/K'S' + l_1/K_1S + l_2/K_1\ (S - u) + x_2/SK_1}$$

La vitesse est inférieure à ce qu'elle serait sans élément, puisque $S/(S - u) > 1$.

$$2x_3\ (K_1l'S/K'S' + l_1 + l_2S/(S - u)) + x_3^2 = (200\ K_1\ \psi/P)t$$

Lorsque le tube horizontal est alimenté par un tube coudé de section S, de longueur moyenne $l'$, la charge qui intervient est $\psi - h$, $h$ étant la différence de cote entre le niveau du plan d'eau et l'axe du tube (fig. 21).

— Pour AB :

$$S(dx_1/dt) = (100/P)\ \frac{\psi - h}{l'/K_1\ S + x_1/K_1\ S}$$

d'où : $2\ x_1\ (l'/S) + x_1^2 = (200\ K_1\ (\psi - h)/P)\ t$

— Pour BC :

$$2x_2\ (l'(S - u)/S + l_1\ (S - u)/S) + x_2^2 = (200\ K_1\ (\psi - h)/P)\ t$$

— Pour CD :

$$2x_3\ (l' + l_1 + l_2S/(S - u)) + x_3^2 = (200\ K_1\ (\psi - h)/P)\ t$$

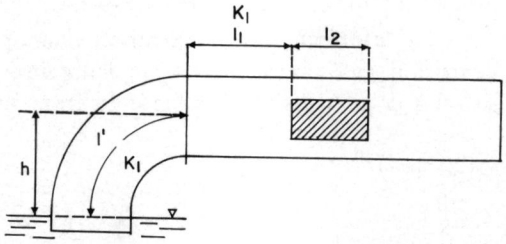



FIG. 21. — *Calcul de l'équation de déplacement du front humide en humectation horizontale, alimentation par un tube coudé*

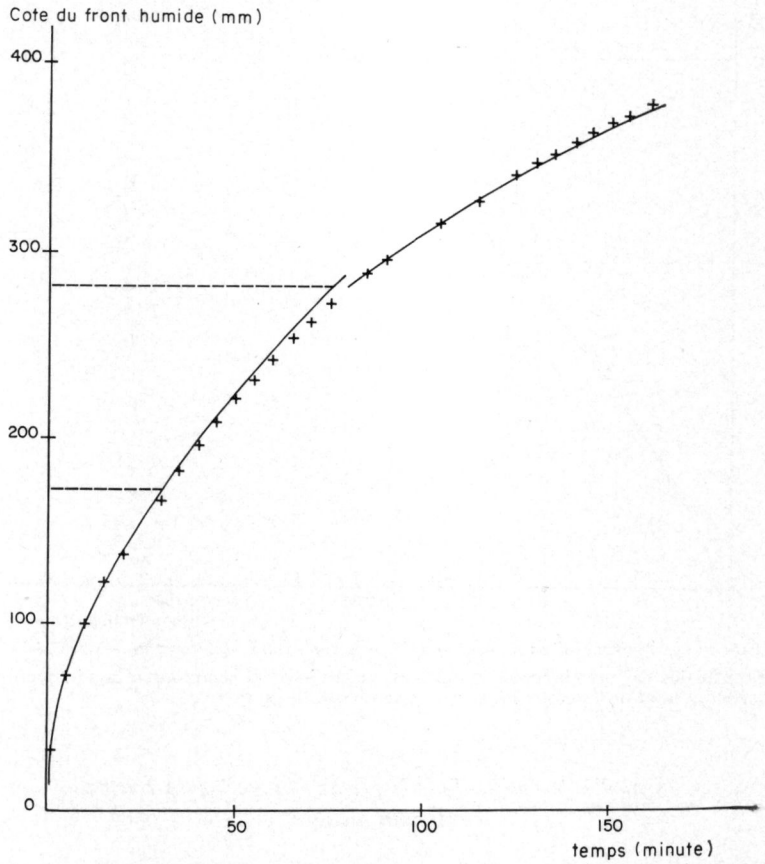



FIG. 22. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale*

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition de résistances hydrauliques; cylindre de 11 cm de hauteur et de 5,9 cm² de surface de section.

Les figures 22 et 23 montrent que l'accord est convenable entre calcul et observation. On remarquera que dans cette série de manipulations l'accord avec la théorie est beaucoup plus satisfaisant qu'avec les autres séries.

Comme il ne paraît pas *a priori* y avoir de raison pour que l'homogénéité de remplissage soit meilleure dans ces manipulations, on peut penser qu'il y a un moindre emprisonnement d'air dû à la progression plus lente du front humide.

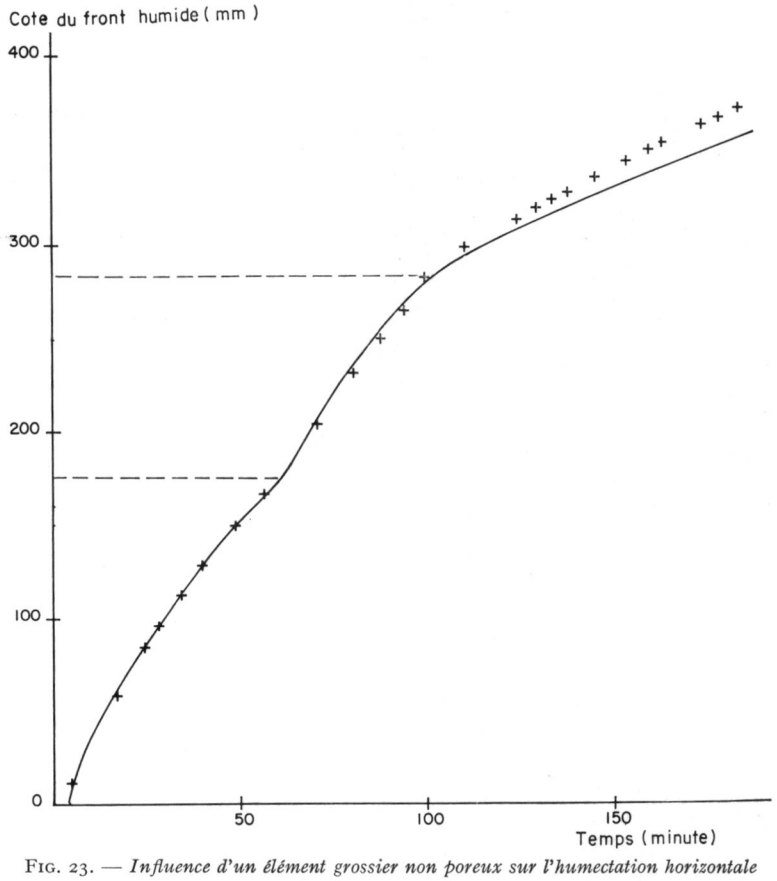



FIG. 23. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale*
Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition de résistances hydrauliques ; cylindre haut de 11 cm et de 12,7 cm² de surface de section.

## 2. 3. — *Essai d'explication dans le cas de l'humectation verticale sans plan d'eau*

On ne peut utiliser ici les lois de l'hydrodynamique en les transposant du capillaire au filtre, puisqu'elles donneraient une loi $z$ — $t$ curviligne, ce qui est en contradiction avec les résultats expérimentaux.

Nous avons donc tenté une explication plus directe, fondée sur des considérations géométriques.

Rappelons qu'on peut distinguer trois vitesses d'avancement du front humide :

$V_0$ vitesse du front humide avant son passage au niveau de l'élément grossier ;

$V_1$ vitesse au niveau de l'élément grossier ;

$V_2$ vitesse après que le front humide ait dépassé l'élément grossier.

Ces vitesses sont sensiblement constantes pour chacun des intervalles. Nous avons tenté de relier les rapports $V_1V_0^{-1}$ et $V_2V_0^{-1}$ au rapport des sections de tube occupées par le sable ; si S est la section intérieure du tube et $u$ la section de l'élément grossier, la section occupée par le sable est S en l'absence d'élément et $(S - u)$ en présence d'élément. Nous avons considéré le rapport inverse $S/(S - u)$, puisque la vitesse augmente lorsque la section diminue. $V_0$, $V_1$ et $V_2$ sont les pentes des différents segments de la courbe $z = f(t)$. Ces pentes ont été évaluées par la méthode des moindres carrés en n'utilisant que les parties rectilignes de cette courbe, ce qui exclut les portions de courbe correspondant à l'établissement des vitesses constantes $V_0$ et $V_2$.

La figure 24, représentant la variation de $V_2 \cdot V_0^{-1}$ en fonction de $S \cdot (S - u)^{-1}$, indiquerait une légère tendance à la diminution de la vitesse $V_2$. Cependant, la pente négative de la droite de régression est inférieure à 0,1, la régression n'étant pas significative. On peut donc admettre en première approximation que la présence d'un

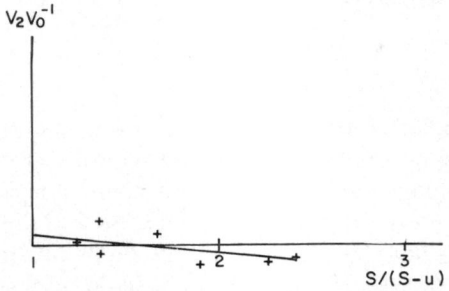



FIG. 24. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

($V_0$) Vitesse du front humide avant le passage au niveau de l'élément, après le passage de l'élément ($V_2$)
S : section intérieure du tube
$u$ : section de l'élément

élément grossier ne diminue pas sensiblement la vitesse du front humide une fois que celui-ci a dépassé l'élément grossier. Si l'on admet, en outre, qu'excepté au voisinage du front humide où existe un gradient net d'humidité, celle-ci est sensiblement la même dans la colonne, la présence de l'élément grossier ne modifie pas à son niveau le débit transmis. Il faut donc qu'au passage de l'élément grossier, il y ait un ou des mécanismes de compensation assurant un débit constant.

Le graphique 25 suggère une relation curviligne croissante entre $V_1V_0^{-1}$ et $S \cdot (S - u)^{-1}$, ce qui traduit l'augmentation de vitesse au niveau de l'élément grossier. La courbe traduisant la liaison précédente doit passer par le point de coordonnées 1,1. En effet, lorsque $u \to 0$, $V_1 \to V_0$, ce qui entraîne $V_1V_0^{-1} \to 1$, et $S\ (S - u)^{-1} \to 1$. Pour l'ensemble des points expérimentaux et du point de coordonnées 1,1, on peut calculer une régression linéaire hautement significative (P : 0,01) entre $V_1V_0^{-1}$ et $\log [S \cdot (S - u)^{-1}]$ :

$$V_1V_0^{-1} = 1{,}374 \log [S. (S - u)^{-1}] + 1{,}121,$$

relation valable pour le sable utilisé et le débit indiqué précédemment. Il est vraisemblable que si la courbe ainsi ajustée ne passe pas par le point de coordonnées 1, 1, c'est à cause de l'ajustement imposé. La courbe représentative peut en première approximation, être assimilée, pour $1 < S/(S - u) < 1{,}5$ à la première bissectrice : $V_1 V_0^{-1} = S.\ (S - u)^{-1}$ ou $V_1(S - u) = V_0 S$, formulation rappelant celle de l'équation de continuité.

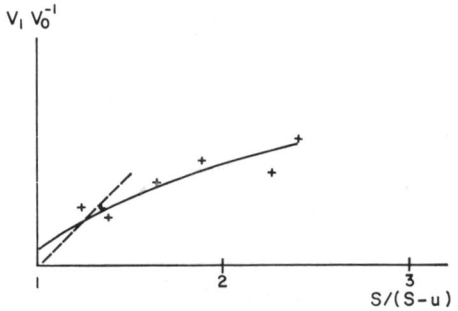



FIG. 25. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

Vitesse du front humide avant le passage au niveau de l'élément ($V_0$), sur niveau de l'élément ($V_1$)
S : section intérieure du tube
$u$ : section de l'élément

On peut indiquer la nature des mécanismes compensateurs assurant la constance du débit. Tant que la réduction de la section utile est faible, la quantité d'eau transmise par le sable dans l'unité de temps est maintenue constante par l'augmentation de la vitesse $V_1$ du front humide, ce qui doit se traduire par une augmentation de la vitesse de l'eau dans les capillaires. Mais pour maintenir un débit constant lorsque $S \cdot (S - u)^{-1} > 1{,}5$, la vitesse $V_1$ croît moins que ne l'implique la diminution de section ; il faut alors imaginer un autre mécanisme pour que le débit reste constant. Peut-être l'eau circule-t-elle dans une fraction plus importante de la porosité totale.

## III. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU

Placé dans un sable en voie d'humectation, un élément grossier poreux peut se comporter de façon différente au cours de l'humectation du système sable - élément grossier :

— avant d'être lui-même saturé d'eau, l'élément grossier peut absorber de l'eau à cause de la succion qu'il exerce ; il retarde ainsi l'humectation du sable ;

— une fois saturé, l'élément grossier peut, du moins théoriquement, transmettre l'eau au sable qu'il contribue alors à humecter.

Pour un élément grossier donné, l'importance de l'absorption et de la transmis-

sion est en quelque sorte inverse : des pores étroits ont pour conséquence une succion élevée, qui va de pair avec une faible perméabilité.

Par ailleurs, les conséquences de ces mécanismes sur l'humectation du sable dépendent aussi des valeurs relatives de la succion du sable et de celle de l'élément rigide, et il en va de même pour les perméabilités.

Nous avons donc porté notre attention sur des éléments rigides de propriétés différentes : un cylindre de craie de 4 cm de diamètre, haut de 5,3 cm, un prisme à base carrée (2,6 cm × 2,6 × 4 cm) constitué de billes de verre agglomérées d'un diamètre compris entre 1 000 et 1 250 μ. On a utilisé aussi un cylindre de calcaire à milioles (diamètre 4 cm, hauteur 6,8 cm), qui présente la particularité de s'humecter lentement.

Nous donnons, dans le tableau 1, les caractéristiques de ces matériaux.

TABLEAU I

*Caractéristiques des matériaux poreux rigides*

| | Succion, exprimée en hauteur d'ascension capillaire (cm) | Coefficient K de Darcy ($cm \cdot mn^{-1}$) |
|---|---|---|
| Craie | 2 200 (1) | 0,000 9 à 0,003 (2) |
| Calcaire à milioles | 1,8 | 0,0003 2 (3) |
| Massif de billes de verre | 2,5 (1) | 15,5 |

(1) Valeur théorique calculée.

(2) Valeurs approximatives, la perméabilité de la craie ne suivant pas la loi de Darcy (Annexe 6).

(3) Matériau contenant certainement de l'air lors de la mesure.

Rappelons que la perméabilité du sable est de 0,07 cm/mn et sa succion 70 cm d'eau.

Les modifications de la cinétique du front humide induites dans le sable par les divers éléments grossiers ont été étudiées en utilisant le dispositif déjà décrit de tubes pleins de sable, longs de 48 cm (Section 1. 1).

Par ailleurs, on a observé les déplacements relatifs des fronts humides dans le matériau grossier et le sable au moyen d'un dispositif spécial que nous décrirons par la suite.

### 3. 1. — *Résultats des expériences*

#### 3. 11. *Filtration en tube vertical avec plan d'eau.*

Les tubes ont été humectés par le haut, en établissant rapidement une lame d'eau, dont l'épaisseur (1 cm) était maintenue constante à l'aide d'un vase de Mariotte. Le débit a été mesuré par pesée de l'eau recueillie à la base du tube.

Les quantités d'eau percolée lorsque le tube contient un cylindre de craie ou de calcaire à milioles sont inférieures à celles du tube témoin plein de sable.

Dans le cas du prisme de billes de verre, on a utilisé des tubes très courts pour que l'effet de ce prisme sur la résistance hydraulique soit appréciable (cf. Section 2.21). Comme le sable a tendance à remplir les espaces entre les billes, tant au moment du remplissage avec du sable sec qu'au cours de la percolation de l'eau, le système sable massif de billes est instable. On a limité cet inconvénient en coiffant la partie supérieure de l'élément par de la toile à bluter. Mais même lorsque le tube est humecté avec précaution par la base (cf. Section 1.31), il est extrêmement

difficile de remplir d'eau le massif de billes de verre. On pouvait imaginer que le sable était peut-être humecté par capillarité au voisinage du massif de billes de verre avant que le plan d'eau libre soit parvenu à son niveau (le sable est peu perméable), emprisonnant ainsi de l'air dans le prisme de billes de verre. On a donc modifié la façon de remplir le tube de sable : on élève successivement le niveau du sable, puis le niveau de l'eau, ce qui revient à jeter le sable dans l'eau. Comme les grains de sable s'arrangent d'une façon différente de celle du remplissage à sec, la perméabilité du filtre ainsi constitué diminue : 0,037 cm/mn au lieu de 0,07. La perméabilité a été calculée à partir du débit d'un filtre complexe comprenant 9,5 cm de sable de Fontenay surmontant 2 cm de sable grossier de perméabilité K′ connue.

La comparaison des débits des tubes témoins et de ceux contenant un prisme de billes de verre montre que la présence de ce dernier augmente le débit, lorsqu'on prend les précautions particulières ci-dessus pour le remplir d'eau.

3. 12. *Infiltration en tube vertical avec plan d'eau.*

On utilise la phase infiltration de l'expérience précédente. Le déplacement du front humide est suivi par l'enregistrement de sa cote $z$ en fonction du temps $t$. La courbe $z = f(t)$ est représentée sur les figures 26, 27 et 28. Pour mieux juger de l'influence éventuelle du corps poreux, on a placé sur la même figure la courbe du déplacement du front humide en l'absence d'élément. Comme nous l'avons vu, cette courbe est construite par extrapolation, à partir des points expérimentaux obtenus avant que le front humide dans le sable soit arrivé au niveau de l'élément grossier.

*Craie.* — Lorsqu'il a atteint le niveau du cylindre de craie, le front humide dans le sable avance en moyenne moins vite que dans le témoin. Une fois que la cote de la base du cylindre de craie a été dépassée par le front humide, sa vitesse moyenne est inférieure à celle qui existerait en l'absence d'élément. Un examen détaillé révèle une diminution de vitesse plus accentuée juste après le passage au niveau de la craie. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue dès que le front humide parvient à la partie supérieure de l'élément rigide.

*Calcaire à milioles.* — Le déplacement du front humide du sable au niveau du cylindre de calcaire à milioles est différent de celui de la craie : la vitesse augmente comme si l'élément n'était pas poreux (cf. Section 2. 12). Cette différence entre la craie et le calcaire à milioles s'explique en partie par la comparaison des quantités d'eau qu'ils ont absorbées : exprimées en $cm^3$ d'eau pour 100 $cm^3$ de volume apparent, elles sont de 11,1 et 40,2 pour le calcaire à milioles et la craie respectivement. Une fois l'élément dépassé, le front humide avance moins vite comme dans le cas de la craie. Il y a également ici diminution de la quantité d'eau fournie au dispositif comme pour la craie.

*Massif de billes de verre.* — La cinétique du front humide est analogue à celle du calcaire à milioles : la vitesse augmente au niveau du massif comme si l'élément n'absorbait pas d'eau ; on n'a effectivement pas trouvé dans l'élément une quantité d'eau appréciable à la fin de l'expérience.

Indiquons enfin qu'on a aussi fait des expériences avec des parallélépipèdes de brique et de verre mousse.

Les effets des éléments grossiers sur la cinétique du front humide du sable au voisinage de l'élément peuvent se résumer ainsi :

— une diminution de la vitesse moyenne pour la craie et la brique, qui exercent une forte succion et s'humectent rapidement ;

— une augmentation de la vitesse moyenne pour le calcaire à milioles, le verre

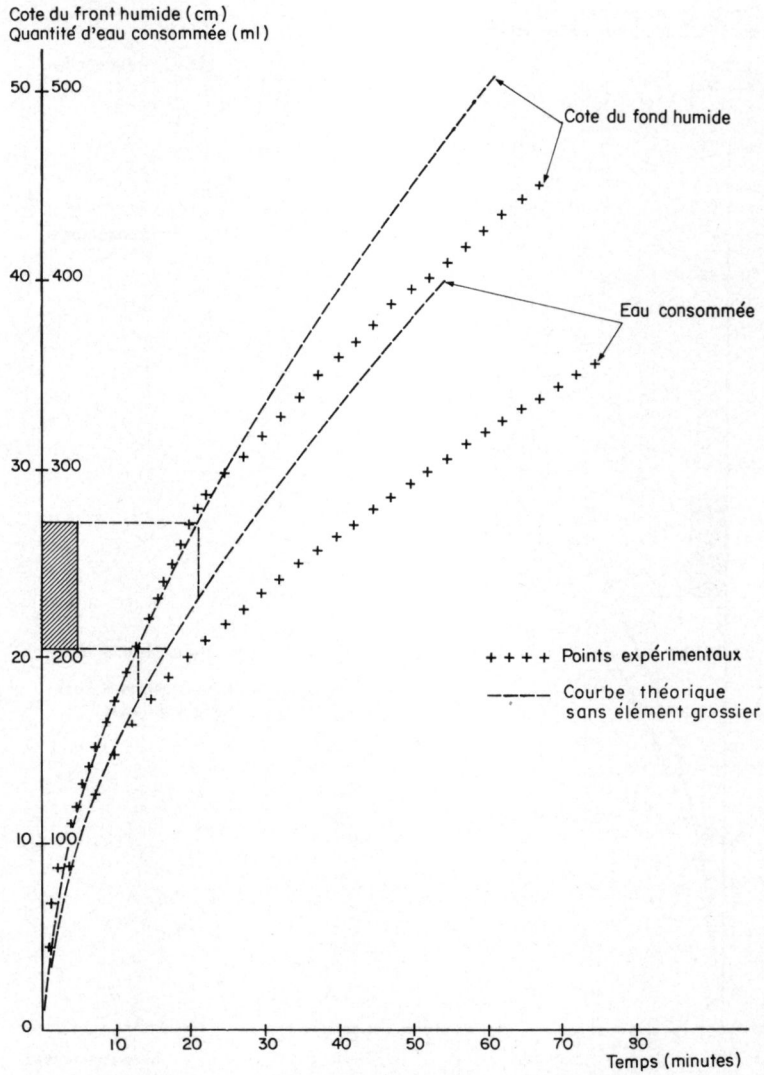



FIG. 26. — *Influence d'un cylindre de calcaire à millioles* (hauteur : 6,8 cm surface de section : 12,5 cm²) *sur l'infiltration avec plan d'eau*

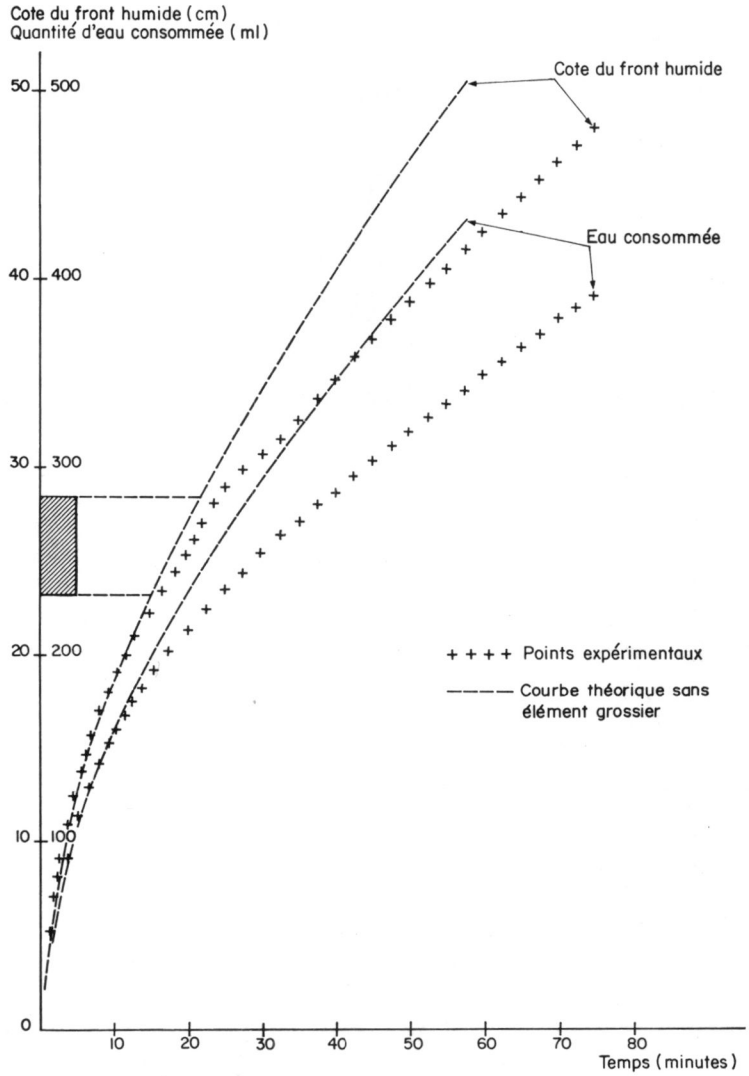



FIG. 27. — *Influence d'un cylindre de craie* (hauteur : 5,3 cm, surface de section : 12,5 cm²) *sur l'infiltration avec plan d'eau*

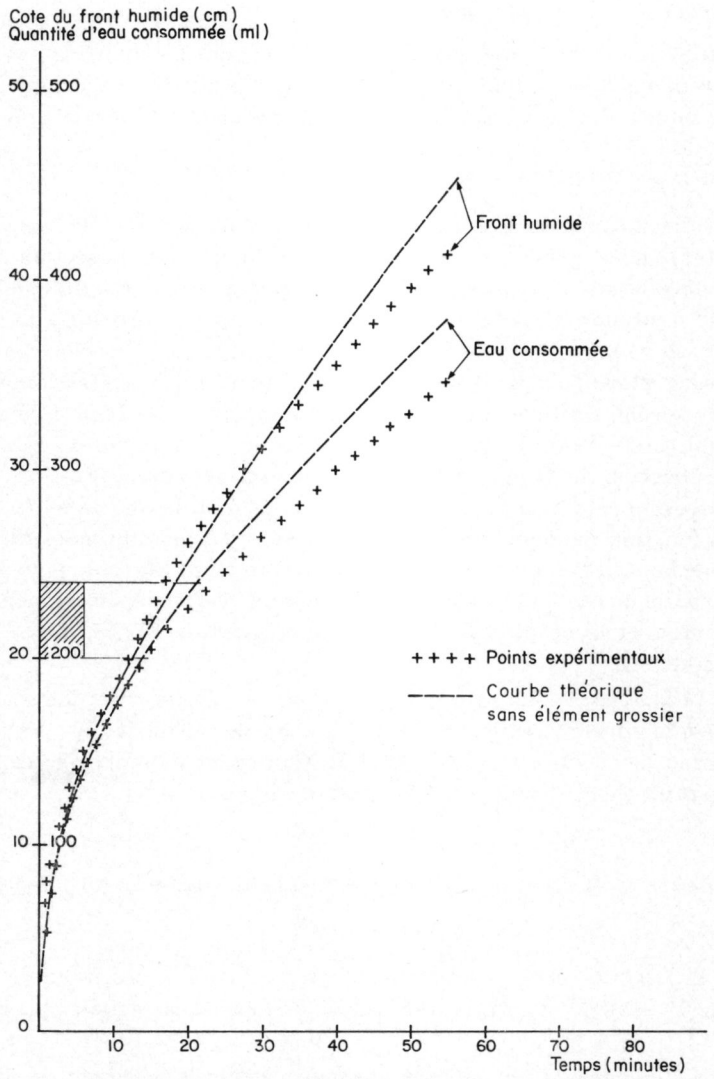



FIG. 28. — *Influence d'un prisme à base carrée* (hauteur : 4 cm, section : 6,8 cm$^2$) *constitué de billes de verre, sur l'infiltration avec plan d'eau*

Diamètre de billes variant entre 1 mm et 1,25 mm

mousse et le massif de billes de verre. Tous ces matériaux qui ont une succion assez faible absorbent peu d'eau et se comportent donc de façon analogue à des éléments non poreux.

Dans tous les cas, une fois l'élément dépassé, la vitesse du front humide diminue.

3. 13. *Humectation verticale sans plan d'eau.*

On a utilisé les mêmes tubes pleins de sable que pour les éléments grossiers non poreux. Nous avons déjà vu que, pour les éléments non poreux, la formule reliant la variation de vitesse du front dans le sable au changement de section utile du sable était simple,

$$\text{pour} \quad 1 < S \cdot (S - u)^{-1} < 1{,}5.$$

Afin de mieux saisir, et, éventuellement, mieux analyser les effets des éléments grossiers poreux, nous nous sommes placé dans ces conditions : la section carrée des éléments étudiés avait 25 mm de côté pour la craie, le calcaire à milioles, le verre mousse et 27 mm pour le massif de billes de verre ; on a utilisé aussi un prisme de brique (20 × 20 × 50).

Ces prismes étaient disposés de façon que leurs axes de symétrie longitudinaux coïncident avec celui du tube. Le débit d'eau apporté était de l'ordre de 48 ml par heure (soit une lame d'eau de 20 mm par heure environ). La cote du front humide est notée en fonction du temps sur 4 génératrices du cylindre.

Les courbes représentant la cote du front humide dans le sol (moyenne de quatre mesures) en fonction du temps peuvent être classées en deux groupes du point de vue du sens de la variation de vitesse au niveau de l'élément (fig. 29) : pour le calcaire à milioles, le verre mousse et le massif de billes de verre, cette vitesse augmente, tandis que pour la craie et la brique elle diminue. La description de ces diverses courbes est donnée ci-dessous.

*Calcaire à milioles.* — La vitesse $V_1$ au niveau de l'élément rigide est *constante* et supérieure à la vitesse $V_0$ existant avant le passage de l'élément ($V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}240$). L'augmentation de la vitesse $V_1$ est toutefois légèrement moindre que celle qui est provoquée par un élément non poreux de mêmes dimensions :

$$V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}248$$

*Verre mousse.* — Il y a également augmentation de vitesse au niveau de l'élément

$$(V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}208)$$

*Massif de billes de verres.* — L'augmentation de vitesse au niveau de l'élément est telle que $V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}470$, rapport élevé à cause de la section plus grande de l'élément.

*Craie.* — Lorsque le front humide passe au niveau de l'élément, la diminution de vitesse, très nette, présente une forme particulière : elle s'accentue avec le temps, puis cesse brusquement avant que le front humide ait atteint la base du parallélépipède. La valeur $V_1$ étant calculée après ajustement linéaire de la courbe cote du front-temps, on a $V^1$ moyen. $V_0^{-1} = 0{,}705$. La brique se comporte de façon analogue à la craie, mais le phénomène est moins accentué.

Dans tous les cas, $V_1$ reprend progressivement la valeur initiale $V_0$ lorsque le front humide a dépassé la base de l'élément rigide.

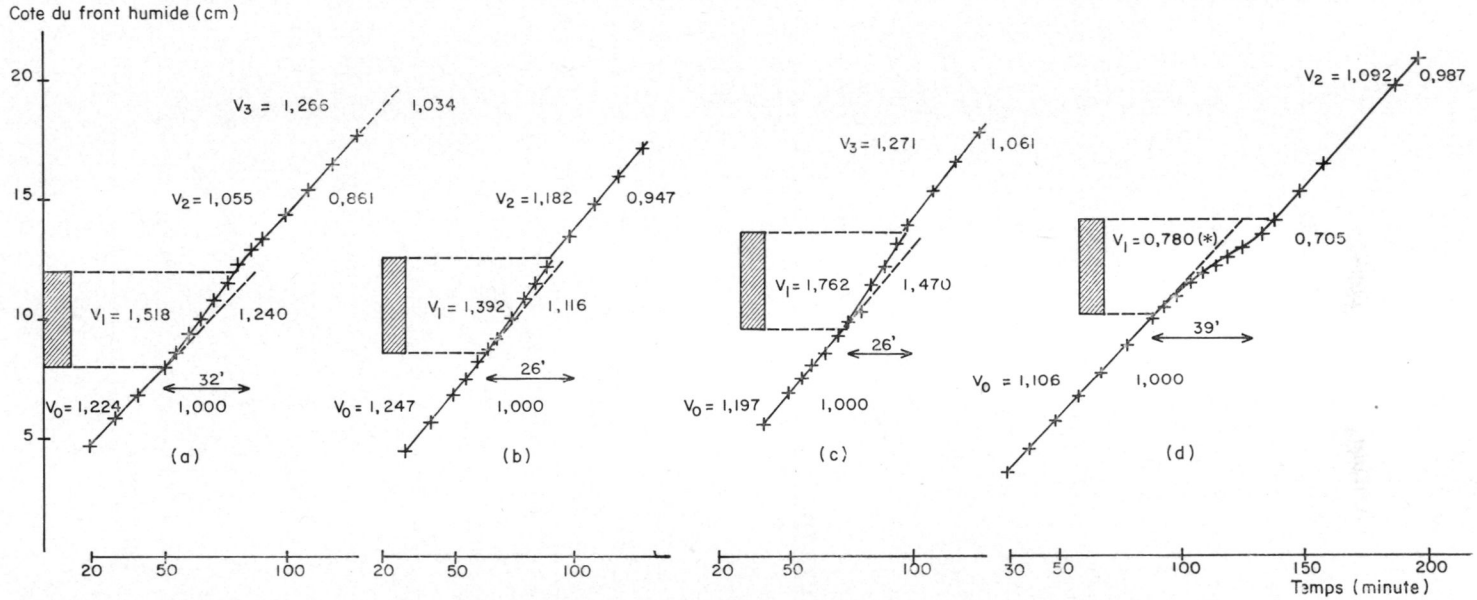



FIG. 29. — *Influence des éléments grossiers poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

*a* : calcaire à milioles = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²
*b* : verre mousse = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²
*c* : billes de verre = hauteur : 4 cm, section : 7,3 cm²
*d* : craie = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²

A droite de la courbe, indices $V_t/V_0$ obtenus en faisant $V_0 = 1{,}000$

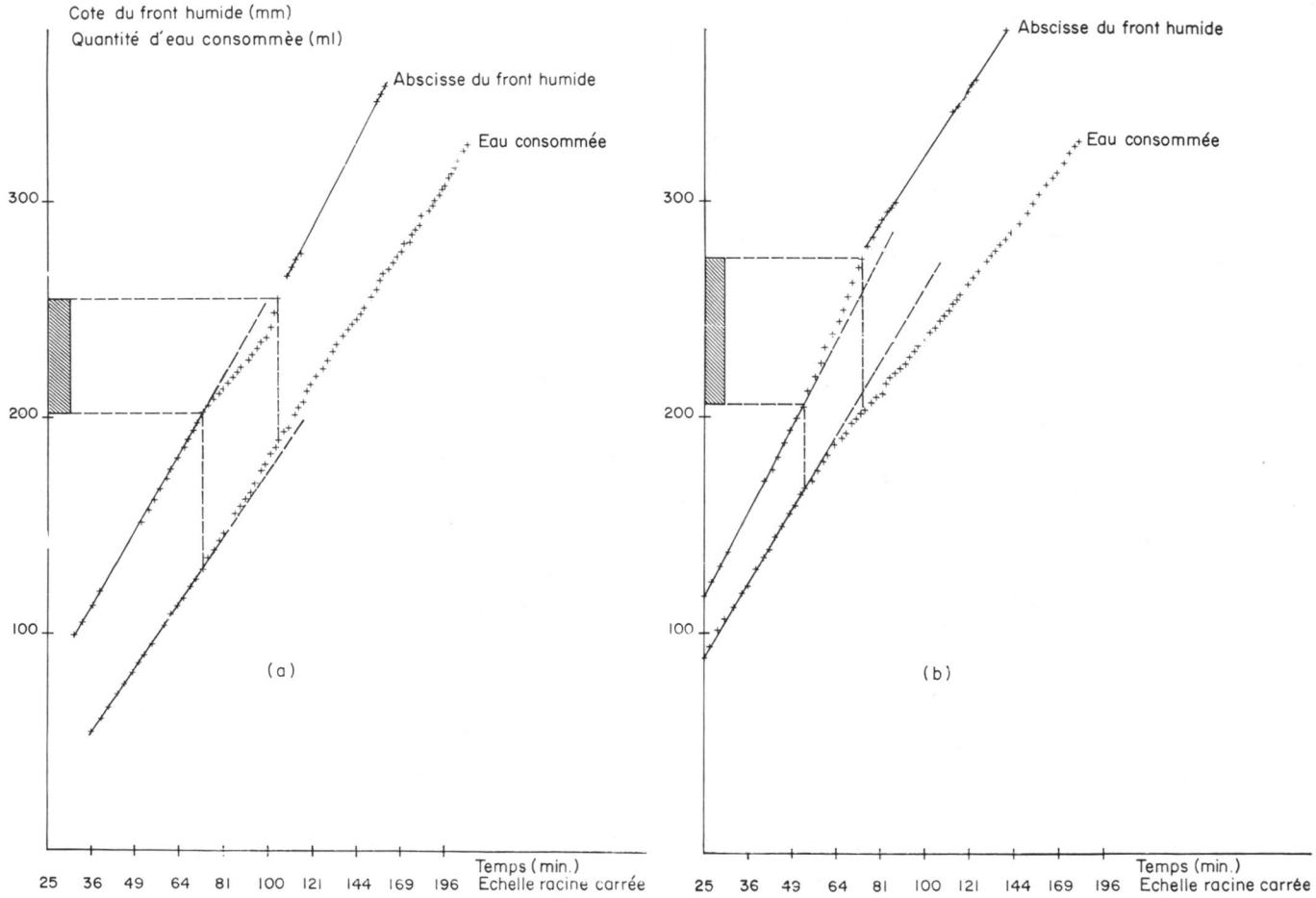



FIG. 30. — *Influence d'éléments grossiers poreux sur l'humectation horizontale*

*a* : craie = hauteur 5,3 cm, section 12,6 cm²
*b* : calcaire à milioles = hauteur 6,8 cm, section 12,6 cm²

3. 14. *Humectation horizontale.*

C'est le dispositif déjà utilisé pour les éléments non poreux qui a été mis en œuvre. On a placé dans le sable un cylindre de craie ou de calcaire à milioles.

La linéarité de la relation $x = f(\sqrt{t})$, où $x$ est l'abscisse du front humide et $t$ le temps, permet de constater facilement les modifications de vitesse apportées au déplacement du front humide (fig. 30).

Pour la craie, la forme de la courbe présente des analogies avec celle obtenue lors des infiltrations et humectations verticales. Au niveau de l'élément, diminution très sensible de vitesse, puis augmentation. Une fois l'élément dépassé, la vitesse diminue. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue légèrement à partir du moment où le front humide du sable aborde l'élément.

Dans le cas du calcaire à milioles, il y a une augmentation de la vitesse du front dans le sable au niveau de l'élément et ensuite un léger ralentissement lorsque le front humide a dépassé l'élément. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue dès que le front humide est arrivé à l'élément.

### 3. 2. — *Observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et l'élément rigide*

Le dispositif comprend un tube ayant une paroi plane transparente contre laquelle on place une face de l'élément rigide (fig. 31) : on peut ainsi suivre en même temps le déplacement du front humide dans le sable et dans l'élément rigide.

Au cours du montage du dispositif, il faut éviter que du sable ne se place entre l'élément rigide et la paroi transparente ; par ailleurs, l'eau ne doit pas s'introduire dans les interstices de dimensions capillaires existant entre la paroi plane transparente et la face observée de l'élément ; cela perturberait l'observation du front humide.

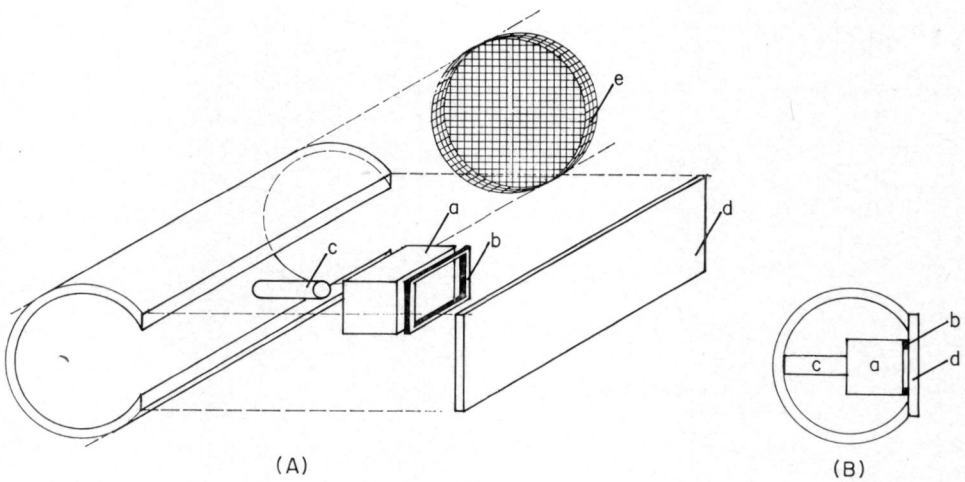



FIG. 31. — *Dispositif expérimental pour l'observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément*

A : vue en perspective du dispositif démonté
B : coupe normale à l'axe :
*a* : élément grossier *b* : joint de caoutchouc
*c* : bouchon de caoutchouc jouant le rôle d'un ressort
*d* : paroi plane transparente
*e* : grillage
Les colliers de serrage maintenant l'ensemble ne sont pas représentés.

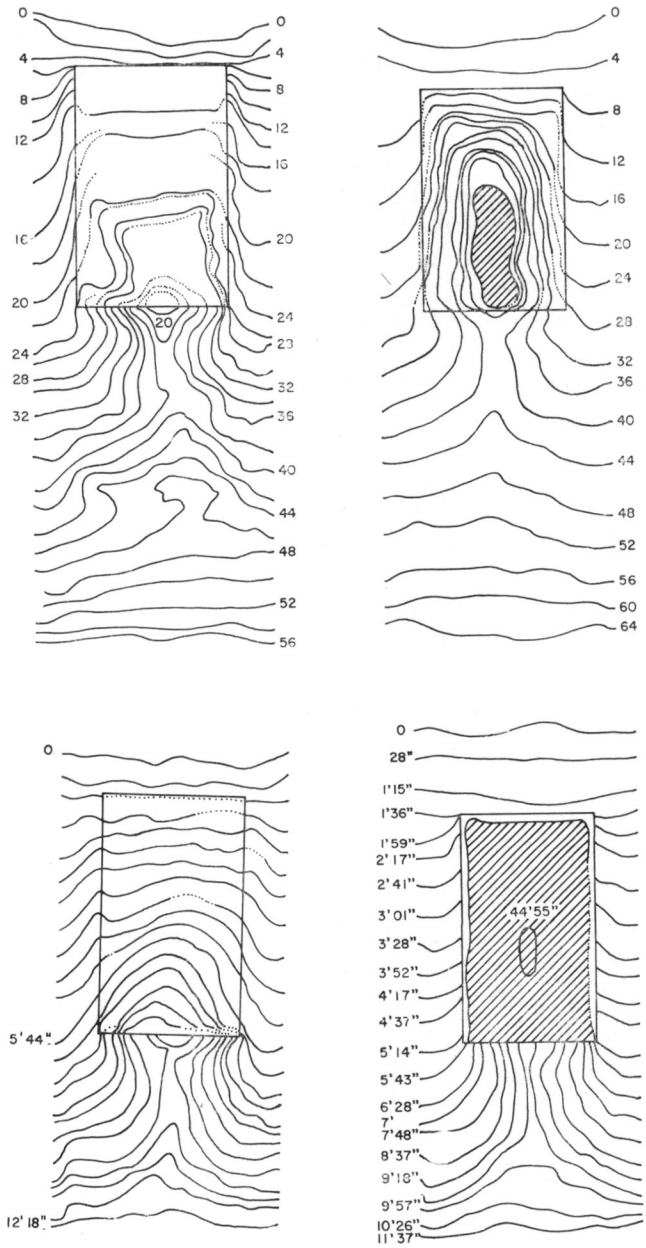



FIG. 32. — *Déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément*

à gauche : craie
à droite : calcaire à milioles
en haut : humectation verticale
en bas : infiltration

Les parties hachurées n'étaient pas humectées à la fin de l'expérience. Les durées sont exprimées en minutes et secondes.

Les inconvénients précédents ont été évités en utilisant un joint de caoutchouc rectangulaire, comme le montre la figure 31, qui représente le dispositif démonté : un bouchon de caoutchouc jouant le rôle d'un ressort, maintient l'élément rigide contre la paroi, le contact élément-paroi se faisant par l'intermédiaire du joint de caoutchouc.

L'étanchéité entre le tube et la plaque était assurée par du mastic.

Des observations ont été effectuées sur la craie et le calcaire à milioles pour l'infiltration avec plan d'eau, l'humectation verticale sans plan d'eau et l'humectation horizontale.

Il était tentant de suivre la progression du front humide par enregistrement photographique. La différence de teinte entre la craie sèche et la craie humide étant très faible, on a coloré l'eau ; mais comme on a observé une zone humide incolore en avant de la zone colorée (ce qui indiquait une séparation de la solution colorée en deux phases), nous n'avons pu retenir ce procédé. On s'est donc limité à l'observation visuelle en dessinant avec un marqueur à feutre les formes successives du front humide.

Dans la figure 32, les résultats sont placés dans une grille à double entrée comprenant horizontalement les matériaux et verticalement les deux catégories d'expériences (infiltration avec plan d'eau, humectation verticale sans plan d'eau). Les schémas auraient été plus comparables si les observations avaient été faites aux mêmes époques dans les deux types de percolation : en fait, cela n'était pas possible, les vitesses de déplacement du front humide étant très différentes pour l'infiltration et l'humectation. La figure 33 représente l'allure des fronts humides dans le cas de l'humectation horizontale.

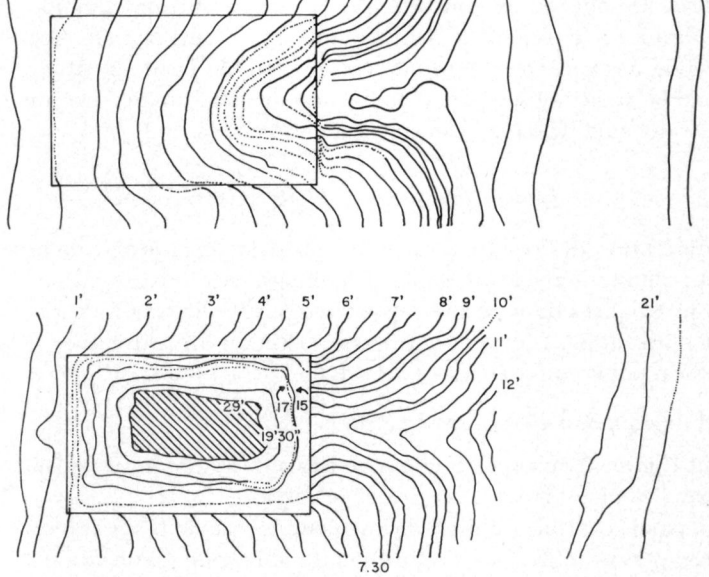



FIG. 33. — *Déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément grossier. Humectation horizontale*

En haut : craie ; en bas : calcaire à milioles

Sur la figure 32, on constate ceci :

— L'humectation est plus rapide dans la craie que dans le calcaire à milioles, certaines parties de ce matériau étant encore sèches à la fin de l'expérience.

— Pour la craie, il existe une différence dans la forme du front humide selon

les expériences : avec l'humectation sans plan d'eau, la trace du front humide est à peu près une droite, ce qui indique que l'alimentation en eau de la craie se fait surtout par la face supérieure horizontale, le front humide avançant assez lentement dans le sable. Dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau, la trace du front humide dans la craie prend progressivement une allure courbe ; en effet, le front humide avançant beaucoup plus vite dans le sable que dans la craie, les parties latérales de la craie reçoivent de l'eau à la fois par le haut (front humide de la craie) et par le côté (front humide du sable).

— Avec le calcaire à milioles, cette courbure progressive apparaît également dans le cas de l'humectation sans plan d'eau, la vitesse de déplacement du front humide dans l'élément étant de beaucoup inférieure à celle du sable ; la trace du front humide a même la forme d'une courbe fermée puisque l'humectation du calcaire à milioles se fait à partir d'un certain moment par le bas. Dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau, l'humectation du calcaire à milioles est quasi nulle ; ceci s'explique par le fait que cette expérience étant plus brève que la précédente, le front humide avance beaucoup plus vite dans le sable.

Dans le cas de la circulation horizontale (fig. 33), la courbure du front humide est très accentuée pour la craie ; pour le calcaire à milioles, la forte courbure du front, jointe à la lenteur de l'humectation, donne au front humide l'allure d'une courbe fermée.

Sur toutes les figures, on constate que la vitesse du front humide diminue une fois que ce dernier a dépassé l'élément, comme on l'a déjà signalé. Ceci indique que l'élément rigide n'est pas en mesure de transmettre de l'eau au sable.

L'ensemble de ces observations met l'accent sur l'importance du rapport des vitesses du front humide dans l'élément et dans le sable.

### 3. 3. — *Interprétation des résultats expérimentaux*

L'interprétation des résultats est différente selon qu'il s'agit de la transmission de l'eau dans le système saturé sable-élément grossier ou des variations positives d'humidité provoquées dans ce même système par l'infiltration et les humectations verticale et horizontale. Dans ces derniers cas, l'humidité varie avec le temps et les coordonnées du point considéré dans le système.

#### 3. 31. *Interprétation dans le cas de la filtration*

Nous utiliserons la composition des résistances hydrauliques du filtre complexe constitué par l'élément grossier saturé et le sable.

Dans la partie centrale du filtre de longueur $l_2$, on a deux résistances en parallèle, celle du sable (perméabilité $K_1$) et celle du matériau rigide (perméabilité $K_2$) (fig. 34) ; la résistance équivalente $J_2$ se calcule ainsi, S étant la section du tube et $u$ celle de l'élément grossier :

$$\frac{1}{J_2} = \frac{1}{l_2/K_1 (S - u)} + \frac{1}{l_2/K_2 u}, \text{ d'où } J_2 = \frac{l_2}{K_1 (S - u) + K_2 u}$$

La conductivité hydraulique globale est : $J_g = J_1 + J_2 + J_3$.

$$J_g = \frac{l_1}{K_1 S} + \frac{l_2}{K_1 (S - u) + K_2 u} + \frac{l_3}{K_1 S}$$

L'effet de l'élément poreux sur la résistance globale se déduit de la comparaison des expressions de $J_g$ écrites avec et sans élément grossier poreux, ce qui modifie seulement le deuxième terme de cette expression. Ce deuxième terme s'écrit

$$l_2/[K_1 (S - u) + K_2 u] \text{ avec élément grossier}$$

et $l_2/K_1 S$ sans élément.

Il suffit de comparer les dénominateurs :

$$\begin{array}{lll} K_1 S - u (K_2 - K_1) & \text{et} & K_1 S. \\ K_1 S - u (K_2 - K_1) < K_1 S, & \text{si} & K_2 > K_1 \\ K_1 S - u (K_2 - K_1) > K_1 S, & \text{si} & K_2 < K_1 \end{array}$$

La présence d'un élément rigide diminuera donc la perméabilité globale si sa perméabilité propre est inférieure à celle du milieu meuble. Ce sera le contraire si l'ordre des perméabilités est inverse.

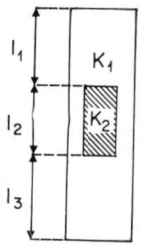



FIG. 34. — *Calcul de la résistance hydraulique d'un filtre complexe constitué d'un élément grossier poreux placé dans du sable*

Les perméabilités des éléments rigides (craie = 0,000 2 cm/mn, calcaire à milioles = 0,000 3 cm/mn) étant inférieures à celles du sable (0,075 cm/mn), on peut s'attendre à une diminution de perméabilité globale lorsqu'ils sont présents dans le filtre. C'est effectivement ce que l'on a constaté.

On peut également vérifier qu'on retrouve par le calcul le rapport entre le débit du tube témoin $D_1$ et celui du tube contenant l'élément grossier $D_2$. En ne tenant pas compte de l'épaisseur du sable grossier à la base du tube (l'erreur est inférieure à $10^{-3}$ pour les tubes longs utilisés ici, cf. section 2. 21), le rapport des débits calculés est $(D_1/D_2)_c$ tel que :

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)_c = \frac{1}{l_1 + l_2 + l_3} \quad \frac{(l_1 + l_3 + l_2 K_1 S)}{K_1 (S - u) + K_2 u}$$

Pour la craie, le rapport $D_1/D_2$ observé est 1,148 et calculé 1,135. La concordance est moins bonne pour le calcaire à milioles : rapport observé 1,289 et calculé 1,175. Dans les deux cas, les différences entre valeurs observées et calculées sont inférieures à l'erreur entraînée sur la valeur calculée par l'imprécision des mesures :

$$\frac{\Delta (D_1/D_2)_c}{(D_1/D_2)_c} = 11 \text{ p. } 100 \text{ (Annexe 7).}$$

L'examen des valeurs numériques des différents termes du rapport $D_1/D_2$ montre que le terme $K_2 u$ n'intervient pratiquement pas sur le résultat. Les valeurs de $K_2$ sont tellement inférieures à la valeur de $K_1$ que tout se passe comme si les éléments rigides (craie et calcaire à milioles) étaient imperméables.

Pour le prisme de billes de verre, le rapport $(D_1/D_2)_c$ est de 0,61, alors que $(D_1/D_2)_0$ est de 0,93 pour 1 heure, 0,87 pour 2 heures et 0,79 pour 3 heures (ces rapports ne sont pas constants, la relation quantité d'eau écoulée-temps n'étant pas rigoureusement linéaire). La précision sur $(D_1/D_2)_c$, de l'ordre de 15 p. 100 (l'erreur relative croît lorsque la longueur du tube diminue) est toujours inférieure à la différence entre $(D_1/D_2)_c$ et $(D_1/D_2)_0$. On ne peut donc dans ce cas conclure à la validité de l'explication par la composition des résistances hydrauliques. Comme la valeur de $D_2$ observée est plus petite que la valeur calculée, il est vraisemblable que du sable fin a colmaté les pores de l'élément rigide, ce qui a diminué sa perméabilité.

3. 32. *Interprétation dans le cas des variations positives d'humidité.*

3. 321. *Considérations générales.*

Pour les humectations, le problème met en jeu un grand nombre de paramètres, que nous énumérerons d'abord, puis classerons dans la mesure du possible. A cette fin, nous distinguerons dans l'humectation du système sable-élément grossier deux phases : l'une, caractérisée par l'humectation de l'élément poreux rigide, dure tant que ce dernier absorbe de l'eau ; l'autre, qui commence au moment où cette absorption d'eau est terminée, peut être une transmission d'eau par l'élément rigide ou une absence d'effet.

a) *Phase d'humectation.*

La quantité d'eau élémentaire, $dQ_E$, fournie au système sable-élément pendant l'intervalle de temps $dt$, se répartit entre le sable $(dQ_1)$ et l'élément $(dQ_2)$ :

$$dQ_E = dQ_1 + dQ_2$$

La quantité d'eau $dQ_1$ peut augmenter l'humidité du sable qui, situé en arrière du front humide, est humecté sans être encore saturé (eau fournie $dQ'$) et/ou faire avancer le front humide de $dz$ en humectant le volume de sable $(S - u)\, dz$ :

$$dQ_1 = dQ' + A\,(S - u)\, dz$$

La quantité d'eau $dQ_2$ peut se répartir de la même façon que ci-dessus dans l'élément grossier ; le front humide n'étant en général plus un plan, nous n'expliciterons pas $dQ_2$.

En divisant l'expression par $dt$, on obtient :

$$(dQ/dt)_E = dQ'/dt + A\,(S - u)\, dz/dt + dQ_2/dt\,;$$

cette équation est valable à chaque instant seulement, parce qu'elle suppose que, dans l'intervalle de temps $dt$, la valeur de A ne change pas de façon appréciable. Elle ne présume en rien de la forme des fonctions $Q_E(t)$, $Q'(t)$ et $Q_2(t)$.

On peut considérer divers cas suivant la régulation du débit par le système, l'absorption d'eau par l'élément rigide et les variations d'humidité du sable en deçà du front humide :

— Le débit d'eau absorbé par le système est indépendant de celui-ci dans l'humectation verticale sans plan d'eau puisque l'expérimentateur impose $(dQ/dt)_E = C$. Mais le débit peut dépendre, en plus des conditions imposées par l'expérimentateur, du système lui-même : Dans l'infiltration, on impose l'épaisseur de la lame d'eau en surface ; le débit absorbé dépend de l'épaisseur de cette lame d'eau, mais aussi du

système : le débit est autoréglé. Une situation analogue se retrouve dans l'humectation horizontale. Les modifications de la circulation d'eau dans le filtre se répercutent sur le débit absorbé lorsqu'il est autoréglé. Par contre, lorsque le débit est indépendant, les modifications de circulation de l'eau ne modifient pas le débit absorbé.

— L'absorption d'eau par l'élément rigide peut être nulle : $dQ_2/dt = 0$, ou appréciable : $dQ_2/dt > 0$.

— La quantité d'eau qui modifie l'humidité du sable déjà humecté peut également être nulle : $dQ'/dt = 0$, ou appréciable : $dQ'/dt > 0$.

Parmi les différentes combinaisons possibles des cas précédents, nous retiendrons celles qui correspondent aux principales expériences :

$dz/dt = \frac{1}{A\ (S - u)}\ C$, débit indépendant, pas de changement d'humidité du sable humecté, pas d'absorption d'eau par l'élément grossier, poreux ou non d'où :

$$z = [C/A\ (S - u)]\ t + C^{te}.$$

$dz/dt = \frac{1}{A\ (S - u)}\ [C - dQ_2/dt]$, débit indépendant, pas de changement d'humidité du sable humecté.

$dz/dt = \frac{1}{A\ (S - u)}\ (dQ/dt)_E$ : débit autoréglé, pas de changement d'humidité du sable humecté, pas d'absorption d'eau par l'élément grossier.

$dz/dt = \frac{1}{A\ (S - u)}\ [(dQ/dt)_E - dQ_2/dt]$, débit autoréglé, pas de changement d'humidité du sable humecté, absorption d'eau par l'élément grossier.

L'eau peut passer du sable à l'élément grossier sous l'influence de son poids, de la pression et de la succion : la gravité intervient dans toutes les situations, la pression nécessite pour se transmettre un minimum de remplissage de la porosité ; enfin, l'eau passe d'un point A à un point B, si la succion est plus élevée en B qu'en A. Notons que la succion dépend de la dimension des pores, mais aussi de leur remplissage plus ou moins complet par l'eau. Tant dans le sable que dans l'élément grossier, l'humidité n'est certainement pas constante en arrière des fronts humides ; il y a en général un gradient d'humidité provoqué par le fait que, dans un corps poreux, les pores n'ont pas tous le même rayon équivalent et que, de ce fait, l'eau avance plus vite dans les capillaires les plus larges. Le schéma 35 montre comment peut se faire le transfert d'eau entre le sable et l'élément grossier. On y voit que la transmission de l'eau à l'élément rigide dépend de la surface de contact entre l'élément et le sable mouillé, qui se décompose en une surface de section constante et une surface latérale croissant avec le temps.

Ceci amène à considérer les vitesses relatives du front humide dans le sable et dans l'élément. A part le cas des vitesses égales (qui suppose que les caractéristiques de porosité sont les mêmes dans le sable et dans l'élément grossier), on distingue *a priori* deux cas :

— Vitesse de front humide plus grande dans le sable que dans l'élément rigide : la trace du front humide dans l'élément rigide prend une forme courbe, puisque de

l'eau est fournie à l'élément par la face horizontale et par la surface latérale.

Dans l'élément, la trace du front humide prend la forme d'une courbe fermée lorsque son déplacement est très lent ; l'élément est alors entouré de tous côtés par le sable humide et il existe en son centre un volume d'air isolé de l'extérieur par le sable humide.

— Vitesse du front humide plus petite dans le sable que dans l'élément grossier. Ce cas qui entraîne que le sable s'humecte à partir des faces latérales de l'élément grossier est très improbable, comme nous le montrerons ultérieurement.

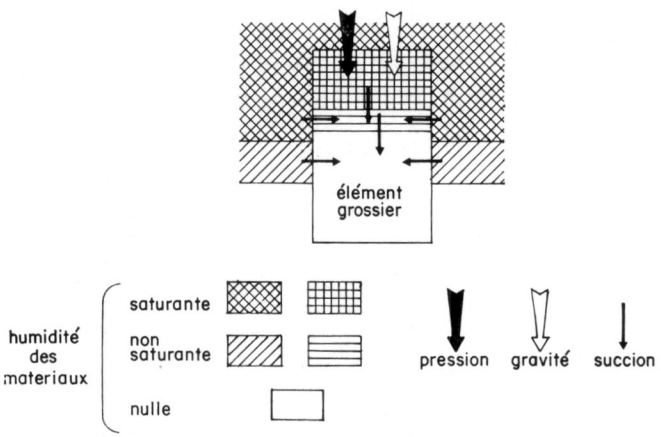



FIG. 35. — *Transfert d'eau du sable à l'élément grossier*
(schéma théorique)

Examinons les conditions de passage de l'eau du sable à l'élément grossier, en supposant que chaque milieu poreux est constitué d'un faisceau de capillaires de même diamètre, dont la mouillabilité est parfaite ; leur rayon est $r_1$ pour le sable et $r_2$ pour l'élément grossier.

$r_1 > r_2$, la succion est plus forte dans l'élément grossier qui est toujours en mesure d'extraire de l'eau du sable. On conçoit alors que, par un phénomène analogue à ce qui se passe dans deux sables contigus de dimensions de grain différentes, l'eau passe, du fait des différences de succion, du milieu le plus grossier au milieu le plus fin, comme l'a montré COURAU (1969).

En définitive même si le sable n'est pas saturé, l'eau passera dans l'élément dès que le front humide du sable arrivera à son contact.

$r_1 < r_2$. Pour analyser ce cas, considérons dans le sable un capillaire de rayon $r_1$ exerçant une succion $\psi_1$, en communication avec un capillaire de rayon $r_2$ exerçant une succion $\psi_2$ placé dans l'élément grossier (fig. 36). Si le sable n'est pas saturé, il y a deux ménisques dans le tube vertical. Pour chacun d'eux, la pression sera $-\psi_1$ par rapport à la pression atmosphérique P*a*. La pression négative dans le tube sera partout égale à $\psi_1$ (fig. 36 *b*). Elle sera inférieure à la pression $\psi_2$ exercée par le capillaire de l'élément rigide ; l'eau ne passera donc pas dans ce dernier. Si l'on impose un plan d'eau d'épaisseur constante (fig. 36 *c*), par rapport à la pression atmosphérique la pression en A est « *a* » et la pression arrière du ménisque est $-\psi_1$. Lorsque le ménisque est au nivean du pore large, l'eau est soumise à une pression négative bien inférieure à la succion $\psi_2$ exercée par le pore large (en négligeant la perte de

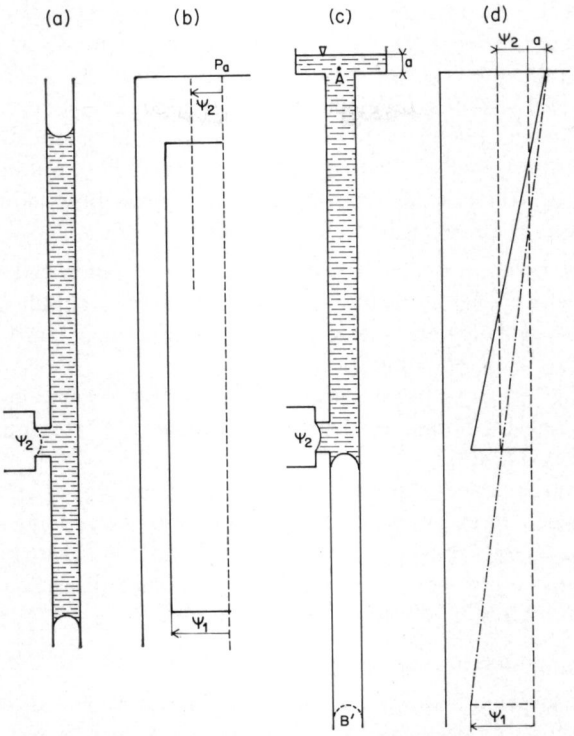



FIG. 36. — *Passage de l'eau d'un capillaire de rayon $r_1$* (sable) *à un capillaire de rayon supérieur $r_2$* (élément poreux rigide)

*a* : pas de plan d'eau
*b* : pression dans le capillaire pour le schéma (*a*)
*c* : avec plan d'eau
*d* : pression dans le capillaire pour le schéma (*c*)

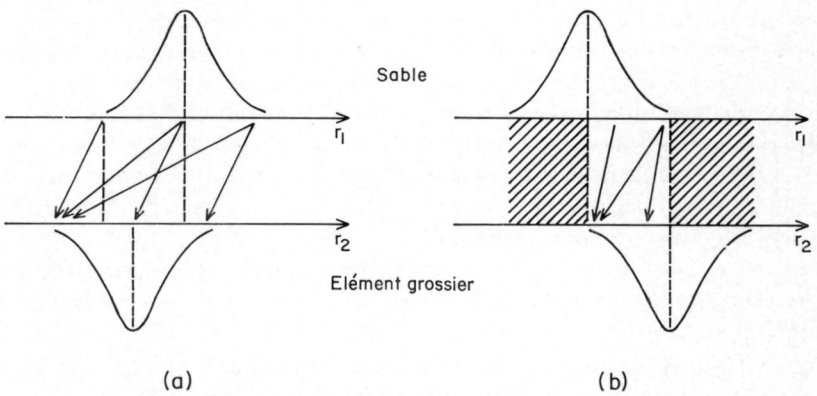



FIG. 37. — *Passage de l'eau des pores du sable à ceux de l'élément grossier*

*a* : possible de tous les pores du sable vers tous les pores de l'élément grossier
*b* : possible seulement d'un groupe de pores du sable vers un groupe de pores de l'élément grossier

charge dans le tube de raccordement très court) : L'eau ne peut passer dans le tube large. Elle ne pourra y passer que lorsque le ménisque dans le sable sera descendu à une cote telle que la pression négative dans l'eau sera inférieure à $\psi_2$ (point B′ de la figure 36 *c*). Les pores de l'élément grossier ne commenceront donc à se remplir que lorsque le front humide du sable sera au-dessous de la partie supérieure de l'élément. Le front humide dans l'élément grossier sera donc toujours en retard par rapport à celui du sable, ce qui conduit à rejeter toute possibilité d'humectation du sable par l'élément grossier au cours de cette phase.

En fait, on n'a pas un rayon de pores, mais une population de rayons dispersés autour d'une valeur moyenne : nous supposerons que les populations de rayons de pores du sable et de l'élément grossier ne sont différentes que par leurs valeurs moyennes $r_m$ (écart type constant).

$r_{m1} > r_{m2}$ (fig. 37 *a*), l'eau peut toujours passer par succion du sable à l'élément grossier, pourvu que les pores des deux milieux soient en communication et aient des diamètres convenables.

$r_{m1} < r_{m2}$ : une partie des pores sera inefficace pour le passage de l'eau du sable à l'élément grossier ; ce seront ceux de l'élément plus larges que ceux du sable et ceux du sable plus étroits que ceux de l'élément (fig. 37 *b*) ; lorsque les gammes de variation des pores n'ont pas de recouvrement, aucun passage d'eau du sable à l'élément n'est possible sous l'influence de la succion.

b) *Phase postérieure à l'humectation.*

Une fois l'absorption d'eau par l'élément rigide terminée, ce dernier peut transmettre de l'eau s'il a une perméabilité suffisante, ou être quasi inerte à cause soit de sa faible perméabilité s'il est plein d'eau, soit de son absence de remplissage.

L'allure du front humide du sable dépend aussi du moment où l'humectation de l'élément est terminée.

3. 322. *Interprétation dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau.*

L'élément grossier poreux provoque des modifications de la loi de déplacement déjà compliquée du front humide du sable [$z + f(z) = At$] ; par ailleurs, la loi de déplacement du front humide dans l'élément grossier est également compliquée, puisque ce front humide est une surface gauche, et que même dans le cas de l'infiltration par la seule surface de section, la loi n'est pas linéaire (Annexe 8).

Rappelons aussi que le pourcentage de saturation *moyen* du sable (rapport du volume d'eau dans le tube à la porosité totale) est seulement de 75 p. 100 ; comme le sable est vraisemblablement saturé dans la partie supérieure du tube proche de la lame d'eau de la surface, le pourcentage de saturation au voisinage du front humide est inférieur à la valeur donnée ci-dessus.

Pour toutes ces raisons, on proposera seulement une explication qualitative de l'effet des éléments poreux sur la cinétique du front humide dans le sable, en comparant à chaque instant :

— la vitesse $dz/dt$ qu'aurait le front humide dans le sable, s'il n'y avait pas d'élément. Cette vitesse décroît avec $z$ puisqu'elle est proportionnelle à : $1 + (a + \psi)/z$

(voir section 1. 42), elle s'écrit : $dz/dt = \frac{1}{AS}(dQ/dt)$ ;

— la vitesse $(dz/dt)_E$ du front humide dans le sable en présence d'éléments

$$(dz/dt)_E = \frac{1}{A\,(S - u)}\,[(dQ/dt)_E - (dQ_2/dt)]$$

On a fait, entre autres, l'approximation que $dQ' = 0$.

En établissant le rapport de ces vitesses, on obtient :

$$\frac{(dz/dt)_E}{dz/dt} = \frac{S}{S - u}\left[\frac{(dQ/dt)_E}{dQ/dt} - \frac{dQ_2/dt}{dQ/dt}\right]$$

Comme l'adjonction de l'élément au système modifie le débit d'eau absorbé qui passe de $dQ/dt$ à $(dQ/dt)_E$, on peut poser : $\frac{(dQ/dt)_E}{dQ/dt} = 1 + k(t)$, $k$ étant une fonction du temps, $> 0$ si l'adjonction de l'élément augmente le débit, $< 0$ dans l'autre éventualité. On peut alors écrire l'expression sous cette forme :

$$\frac{(dz/dt)_E}{dz/dt} = \frac{1 + k(t) - (dQ_2/dt)/(dQ/dt)}{1 - u/S}$$

Cette équation représente les changements de vitesse du front humide dans le sable sous l'influence de deux effets antagonistes : augmentation de vitesse du front humide dans le sable par suite de la diminution de section de tube pleine de sable (le rapport croît si $u$ croît), ralentissement de ce front à la suite de l'absorption d'eau par l'élément poreux (le rapport décroît si $dQ_2/dt$ décroît).

Le rapport des vitesses est donné par la valeur du deuxième membre de l'équation :

$$(dz/dt)_E > (dz/dt) \quad \text{si} \quad (dQ_2/dt) \,/\, (dQ/dt) - k(t) < u \,/\, S \qquad (1)$$

$$(dz/dt)_E < dz/dt \quad \text{si} \quad (dQ_2/dt) \,/\, (dQ/dt) - k(t) > u \,/\, S \qquad (2)$$

Ces inégalités comparent une différence de rapports sans dimensions concernant les débits :

$$\frac{\text{débit absorbé par le système sans élément}}{\text{débit absorbé par l'élément}} + \left\{\begin{array}{l}\text{indice de variation de débit absorbé}\\ \text{par le système provoquée par l'élé-}\\ \text{ment grossier}\end{array}\right.$$

à un rapport sans dimension concernant les sections :

$$\frac{\text{surface de section de l'élément}}{\text{surface de section du système}}$$

Pour *la craie*, on a constaté une diminution de $(dQ/dt)_E$ par rapport à $dQ/dt$, donc $k < o$.

La comparaison des courbes $(dz/dt)_E - z$ et $(dz/dt) - z$ (cette dernière étant obtenue par extrapolation au-delà de la cote du sommet de l'élément) fait apparaître trois zones (fig. 38) :

— $(dz/dt_E < (dz/dt)$ pour un intervalle d'espace dont les bornes sont le haut de l'élément et le point situé 3 à 4 cm au-dessous. On a les inégalités (2) ci-dessus.

Les variations de vitesse instantanée sont assez compliquées dans cet intervalle, peut-être à cause d'hétérogénéités locales, mais l'inégalité des vitesses y est cependant toujours vérifiée. Dans ce cas la valeur des expressions concernant les débits l'em-

porte sur celle concernant les sections, ce qui correspond à une forte absorption instantanée par la craie.

La vitesse du front humide du sable passe ensuite par un minimum. Signalons que la quantité totale d'eau absorbée par la craie au cours de l'expérience représente 40 p. 100 de son volume apparent.

— $(dz/dt)_E > (dz/dt)$ depuis la borne supérieure de l'intervalle précédent jusqu'au bas de l'élément. Les inégalités (1) sont vérifiées, l'absorption d'eau étant moins importante que précédemment.

— Une fois l'élément dépassé, la vitesse $(dz/dt)$ diminue fortement avant de croître à nouveau. Cette diminution temporaire de vitesse s'explique par le fait que la craie ne transmet pas d'eau au sable en quantité appréciable (elle est $10^{-2}$ environ moins perméable que lui) : pour humecter le sable sec qui se trouve sous la craie, l'existence d'une composante horizontale du déplacement de l'eau est nécessaire (cf. fig. 13).

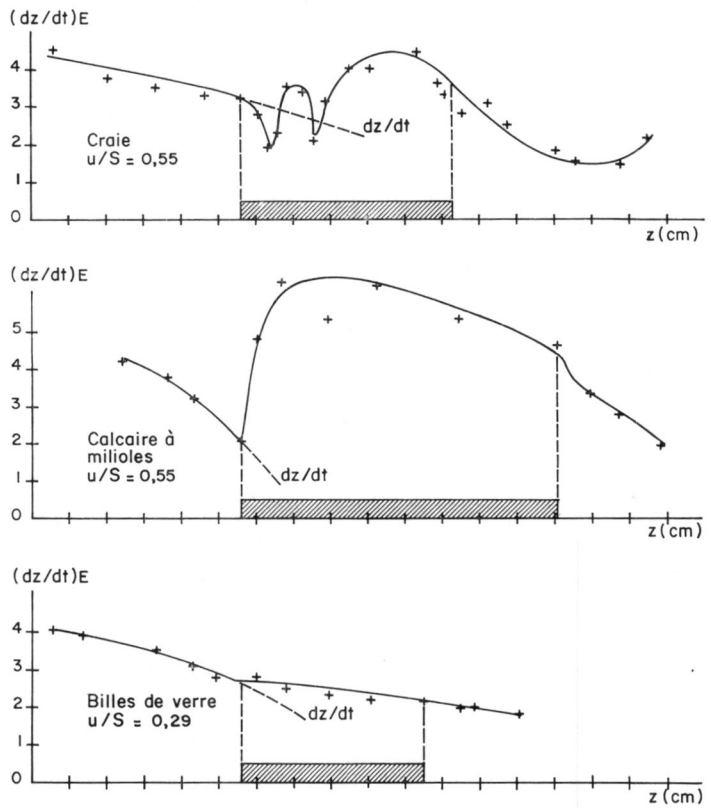



FIG. 38. — *Influence d'éléments grossiers poreux sur l'infiltration vitesse instantanée en fonction de la cote*

Pour le *calcaire à milioles*, on a encore $k(t) < 0$, mais constamment $(dz/dt)_E > (dz/dt)$ (fig. 38).

Les inégalités (1) sont satisfaites. Ceci s'explique par la faible valeur de $dQ_2/dt$, la quantité d'eau absorbée par l'élément étant seulement de 11 p. 100 de son volume

apparent. La vitesse $(dz/dt)_E$ passe par un maximum avant de diminuer, elle présente une diminution plus marquée une fois que le front humide a dépassé l'élément, pour les mêmes raisons que la craie.

Comme *le prisme de billes* de verre a une section moindre que les éléments ci-dessus, l'augmentation de vitesse est moins marquée que pour le calcaire à milioles (fig. 38). En effet, quoique sa perméabilité soit plus élevée que celle du sable, il s'est comporté en fait comme un corps non poreux. Placé au sein du sable, il n'a pas absorbé d'eau comme on l'a constaté à la fin de l'expérience, certainement à cause de sa faible succion et du fait qu'au moment où l'eau pouvait pénétrer dans ses pores (fig. 36) il était entouré de sable humide de toutes parts, ce qui pouvait empêcher l'expulsion de l'air.

3. 323. *Interprétation pour l'humectation verticale sans plan d'eau.*

L'expression générale fournissant le rapport des vitesses du front humide dans le sable (cf. section 3. 3. 2. 2) se simplifie en remarquant que dans ce cas :

— le débit absorbé étant indépendant du système : $k(t) = 0$ et $dQ/dt = C$, C étant une constante ;

— la vitesse du front humide en l'absence d'élément est constante et égale à $V_0$.

On obtient donc $(dz/dt)_E = V_0 \dfrac{1 - (dQ_2/dt)/C}{1 - u/S}$

Pour le prisme de billes de verre, le verre mousse et le calcaire à milioles, la vitesse $(dz/dt)_E$ est constante au passage de l'élément, ce qui entraîne $dQ_2/dt = C'$, $C'$ étant une constante. En posant $(dz/dt)_E = V_1$, l'expression devient alors :

$$V_1/V_0 = \frac{1 - C'/C}{1 - u/S}$$

Cette formule constitue une approximation de la réalité pour la craie et la brique, puisque $(dz/dt)_E$ varie avec le temps.

Écrite sous la forme : $V_1 V_0^{-1} = \left(\dfrac{C - C'}{C}\right)\left(\dfrac{S - u}{S}\right)$, elle traduit les influences antagonistes de la variation relative de débit disponible pour humecter le sable $(C - C')/C$, et de la variation relative du volume de sable à humecter, traduite par les variations de section correspondantes.

Elle permet de retrouver le sens de la variation de vitesse :

$V_1/V_0 > 1$ si $1 - C'/C > 1 - u/S$, $C'/C < u/S$

la diminution de volume à humecter l'emporte sur la diminution de volume disponible pour humecter le sable. Cas de tous les éléments sauf la brique et la craie dans les conditions des expériences.

$V_1/V_0 < 1$ $C'/C > u/S$, conditions réalisées dans les expériences avec la brique et la craie, l'absorption d'eau par ces éléments étant importante.

On peut calculer avec cette formule la quantité d'eau absorbée par l'élément poreux $Q_2 = C't$ et comparer la valeur ainsi calculée à la valeur obtenue par pesée de l'échantillon (GRAS, 1968). On tire $C'$ de l'équation précédente dans laquelle $V_0$, $V_1$, $u$, S et C sont connus, la durée d'absorption $t$ est évaluée par l'examen des courbes

cote du front humide temps (fig. 29) : on admet que l'élément absorbe de l'eau tant que la vitesse du front humide est abaissée de façon appréciable. Pour la brique et la craie on a fait une approximation en prenant pour $V_1$ la pente de la droite de régression calculée à l'aide des points expérimentaux.

Le tableau 2 permet de comparer les valeurs calculées et mesurées.

TABLEAU 2

*Quantités d'eau absorbées par les éléments grossiers*

| Matériau | | Billes de verre | Verre mousse | Calcaire à milioles | Brique | Craie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Quantité d'eau absorbée par l'élément (g) | mesurée | 0 | 2,7 | 2,8 | 5,9 | 10,6 |
| | calculée | 0 | 0,1 | 2,7 | 5,0 | 12,8 |

La concordance entre les valeurs mesurées et calculées est excellente pour les billes de verre ($V_1 = V_0/(1 - u/S)$, puisque $Q_2 = 0$), et le calcaire à milioles. Pour le verre mousse, le désaccord est très important ; avec la brique et la craie, le désaccord provient vraisemblablement de l'approximation faite en considérant une vitesse moyenne constante.

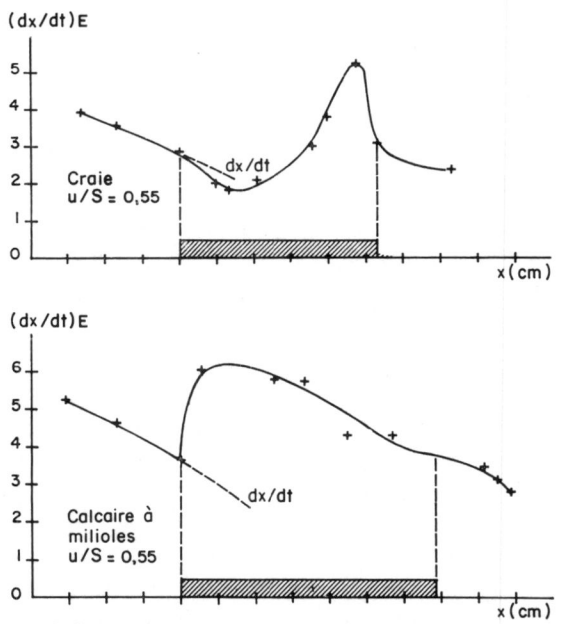



FIG. 39. — *Influence d'éléments grossiers poreux sur l'humectation horizontale vitesse instantanée en fonction de l'abscisse*

Le comportement des billes de verre montre qu'un corps poreux peut avoir le même effet qu'un corps non poreux de volume et de forme identiques, l'absorption d'eau dépendant en définitive des rayons équivalents des pores du corps poreux et du sable ; dans le cas de l'infiltration sans plan d'eau, l'eau est retenue par le sable avec une succion de 30 cm d'eau environ (d'après la courbe humidité succion).

La craie est le seul élément pour lequel le calcul surestime la quantité d'eau absorbée, vraisemblablement parce que la loi $Q_2 = f(t)$ est plus compliquée que la loi linéaire utilisée ici.

3. 324. *Humectation horizontale.*

La comparaison des courbes $(dz\text{-}dt)_E$ et $(dz/dt)$ (fig. 39) met en évidence des effets analogues à ceux déjà notés dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau.

En présence de craie, la vitesse du front humide passe par un minimum, puis par un maximum avant de diminuer après le passage de l'élément.

Pour le calcaire à milioles, la vitesse $(dz/dt)_E$ est constamment supérieure à $dz/dt$, et sa variation présente la même allure que dans le cas de l'infiltration verticale avec plan d'eau.

## IV. — CONCLUSIONS SUR LES EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DU SABLE

### 4. 1. — *Front humide dans le sable au niveau de l'élément*

On compare, pour une même valeur de la cote ou de l'abscisse du front humide dans le sable, la vitesse instantanée de ce front $(dz/dt)_E$, à la vitesse qu'aurait ce même front en l'absence d'élément $(dz/dt)$. Le sens des expressions utilisées est rappelé ci-dessous :

débit instantané absorbé par l'élément : $dQ_2/dt$,

débit instantané fourni au système sans élément : $dQ/dt$ (pour certaines expériences : $dQ/dt = C$),

rapport des surfaces de section de l'élément et du tube : $u/S$.

*Lorsque l'élément grossier n'absorbe pas d'eau,* le front humide dans le sable avance plus vite que dans le témoin. Dans le cas où le débit absorbé est indépendant du système (humectation verticale) la vitesse constante $(dz/dt)_E$ peut se calculer dans certains cas à partir de considérations simples. Si le débit est autoréglé (infiltration, humectation horizontale), $(dz/dt)_E$ peut être calculé en utilisant les lois de l'hydrodynamique et la composition des résistances hydrauliques.

*Si l'élément grossier absorbe de l'eau,* le signe de l'expression $e$ :

$$\frac{\text{débit absorbé par élément}}{\text{débit absorbé par le système sans élément}} + \text{indice de variation de débit absorbé provoqué par le système} - \frac{\text{surface de section de l'élément}}{\text{surface de section du système}}$$

situe la valeur du rapport $(dz/dt)_E/(dz/dt)$ par rapport à 1, lorsque le débit est autoréglé :

$$(dz/dt)_E > (dz/dt) \quad \text{si} \quad e < 0$$
$$(dz/dt)_E < (dz/dt) \quad \text{si} \quad e > 0$$

Si le débit absorbé est indépendant du système, l'expression ci-dessus se simplifie, l'indice de variation de débit étant nul. C'est la balance entre la diminution du volume de sable à humecter (qui augmente la vitesse du front humide) et la consommation d'eau par l'élément (qui diminue cette même vitesse) qui détermine le sens de la variation de vitesse. Le tableau 3 rassemble les principaux résultats.

### 4. 2. — *Front humide dans le sable au-delà de l'élément*

Dès que le front humide a dépassé l'élément grossier, une partie de l'eau sert à humecter le sable placé immédiatement sous l'élément, ce qui perturbe la vitesse.

Une fois cette perturbation disparue, on a les cas suivants :

— Débit absorbé indépendant du système : dans le cas d'absorption nulle (corps non poreux ou corps poreux ne se remplissant pas), la vitesse du front humide du sable reprend la valeur $V_0$ qu'elle avait avant que l'élément ait été atteint par le front. Lorsque l'absorption est appréciable, la vitesse reprend plus ou moins rapidement la valeur $V_0$, selon que l'absorption d'eau par l'élément dure plus ou moins longtemps ; en général, de tels effets sont difficiles à mettre en évidence.

— Débit autoréglé : la présence de l'élément augmentant la résistance hydraulique (élément non poreux — poreux peu perméable ou ne se remplissant pas d'eau), la vitesse du front humide est toujours réduite par la présence de l'élément. Il faut insister sur le cas, aberrant à première vue, de corps à perméabilité élevée qui augmentent la résistance hydraulique parce qu'ils ne peuvent s'emplir d'eau.

Pour un corps poreux placé dans le sable, il y a théoriquement une phase d'humectation (lorsqu'il se remplit d'eau) et une phase de transmission de l'eau au sable. Chaque corps poreux n'intervient pas forcément avec la même intensité dans ces deux phases, l'action pouvant même être nulle pour l'une et/ou l'autre de ces phases Le tableau à double entrée représente les diverses éventualités théoriquement pos sibles, le signe + indiquant une intervention et le signe 0 son absence.

| | | Transmission | |
|---|---|---|---|
| | | + | 0 |
| Humectation | + | 1 | 2 |
| | 0 | 3 | 4 |

L'éventualité 1 correspond au cas d'un corps poreux, qui, après s'être humecté, transmettrait de l'eau au sable ; il n'a pas été possible de mettre en évidence un comportement de ce genre, qui implique des pores de dimensions telles que leur succion soit supérieure à celle du sable et que leur pouvoir de transmission de l'eau soit encore appréciable.

TABLEAU 3

*Vitesse du front humide* $(dz/dt)_E$ *dans le sable au niveau de l'élément grossier*

| Alimentation en eau du système | Absorption par l'élément grossier | |
|---|---|---|
| | Nulle : $dQ_2/dt = 0$ | Appréciable : $dQ_2/dt > 0$ |
| *Débit indépendant du système*<br>(Pas de plan d'eau, alimentation goutte à goutte)<br>$dz/dt = V_0$ | pour $S \cdot (S - u)^{-1} < 1{,}5$ :<br>$V_1 = V_0 \cdot S \cdot (S - u)^{-1}$<br>pour $S \cdot (S - u)^{-1} > 1{,}5$ :<br>$V_1 = 1{,}37 \log [S \cdot (S - u)^{-1}] + 1{,}1$<br>D'après ces expressions dans tous les cas<br>$V_1 > V_0$, ou $(dz/dt)_E > (dz/dt)$<br>Pour • éléments non poreux<br>• éléments poreux n'absorbant pas d'eau : billes de verre | pour $S(S - u)^{-1} < 1{,}5$<br>$(dz/dt)_E = V_0 \dfrac{1 - (dQ_2/dt)\ (dQ/dt)}{1 - u/S}$<br>pour craie et brique<br>$V_1 = V_0 \dfrac{1 - (dQ_2/dt)/C}{1 - u/S}$ pour calcaire à milioles, verre mousse.<br>$(dz/dt)_E/(dz/dt)$ est $>$ ou $<$ 1 suivant que $(dQ_2/dt)/(dQ/dt)$ est inférieur ou supérieur à $u/S$, |
| *Débit autoréglé par le système*<br>+ infiltration verticale (lame d'eau d'épaisseur constante en surface) | $\dfrac{(dz/dt)_E}{(dz/dt)} = \dfrac{z/K_1 + l_1/K_1}{z/K_1 + \dfrac{l_1 (S - u)}{K_1 S}}$<br>d'après le calcul de 2. 22<br>D'après cette expression :<br>$(dz/dt)_E > (dz/dt)$ | Pas de formule générale<br>$(dz/dt)_E/(dz/dt)$ est $> 1$ ou $< 1$ suivant que $(dQ_2/dt)/(dQ/dt) - k$ est inférieur ou supérieur à $u/S$,<br>$k$ : indice de variation de débit absorbé provoqué par l'élément grossier. |
| + infiltration horizontale (tube coudé plongeant dans l'eau) | $\dfrac{(dx/dt)_E}{(dx/dt)} = \dfrac{x/K_1 + l_1/K_1}{x/K_1 + \dfrac{l_1 (S - u)}{K_1 S}}$<br>d'après le calcul de 2. 23.<br>D'après cette expression :<br>$(dx/dt)_E > dx/dt)$<br>Pour • éléments non poreux<br>• éléments poreux n'absorbant pas d'eau : billes de verre | |

Le cas 2 correspond à celui de la craie, qui s'humecte rapidement au détriment du sable, à cause de la succion élevée des pores fins, qui sont, par contre, très défavorables à la transmission de l'eau.

Le comportement de type 3 est impossible, puisqu'un matériau ne peut pas transmettre de l'eau, sans s'être humecté préalablement.

Le comportement de type 4 a été mis en évidence pour le prisme de billes de verre : pas d'humectation et donc pas de transmission. Signalons enfin que le système constitué par un matériau à gros pores placé dans du sable est instable, le volume poral se remplissant peu à peu de sable.

## V. — HUMECTATION DES MATÉRIAUX POREUX RIGIDES PAR L'INTERMÉDIAIRE DU SOL

Nous nous attachons maintenant à l'étude de l'humectation des éléments grossiers par l'intermédiaire du sol. A cet effet, nous rassemblons les résultats d'humectation obtenus dans les expériences en tube précédentes. Ces résultats sont complétés par ceux d'expériences complémentaires sur la succion dans la terre et la durée de contact sable éléments grossiers.

### 5. 1. — *Expériences sur la succion appliquée à l'eau de la terre*

Ces expériences de durées différentes étudient l'humectation de matériaux poreux rigides par l'intermédiaire de trois terres, dont l'eau est soumise à des succions contrôlées différentes.

#### 5. 11. *Dispositif expérimental.*

L'appareil de Haines, utilisé pour amener l'eau dans la terre à une tension donnée (fig. 40), comprend un Büchner à plaque de verre fritté n° 4 relié par un tuyau souple à un entonnoir. La tension d'humidité en un point donné du sol est la différence des cotes de ce point et du niveau d'eau dans l'entonnoir.

FIG. 40. — *Humectation dans un appareil de Haines*

*a* : plaque poreuse
*b* : élément poreux rigide
*c* : terre
*h* : valeur de la succion

Comme l'élément poreux a 25 mm d'épaisseur, la succion dans la terre est plus basse à la partie inférieure de l'échantillon ; dans la suite du texte,nous donnons comme valeur de la succion celle existant dans la terre à la base du büchner.

Pour remplir l'appareil de Haines, on maintient l'eau à une tension élevée de 150 cm d'eau, de façon à humecter le moins possible la terre, ce qui facilitera son tassement.On place une couche

TABLEAU 4

*Pourcentages pondéraux des fractions granulométriques des sols utilisés*

| Sable de Fontainebleau | Sable de Fontenay | Horizon B de Versailles |
|---|---|---|
| Matière organique : Traces | Matière organique : 0,8 | Matière organique : 0,40 |
| | 0-2 $\mu$ = 5,0 | 0-2 $\mu$ = 29,95 |
| | 2-20 $\mu$ = 0,9 | 2-20 $\mu$ = 26,95 |
| 0-50 $\mu$ = Traces | 20-50 $\mu$ = 1,1 | 20-50 $\mu$ = 41,15 |
| | 50-63 $\mu$ = 0,2 | |
| 50-100 $\mu$ = 0,08 | 63-100 $\mu$ = 12,1 | |
| | 100-125 $\mu$ = 57,5 | |
| 100-200 $\mu$ = 8,11 | 125-160 $\mu$ = 20,9 | |
| | 160-200 $\mu$ = 1,5 | 50-200 $\mu$ = 1,15 |
| 200-500 $\mu$ = 91,00 | 200 $\mu$ = 0,2 | |
| 500-1 000 $\mu$ = 0,80 | | |
| | | 200-2 000 $\mu$ = 0,30 |

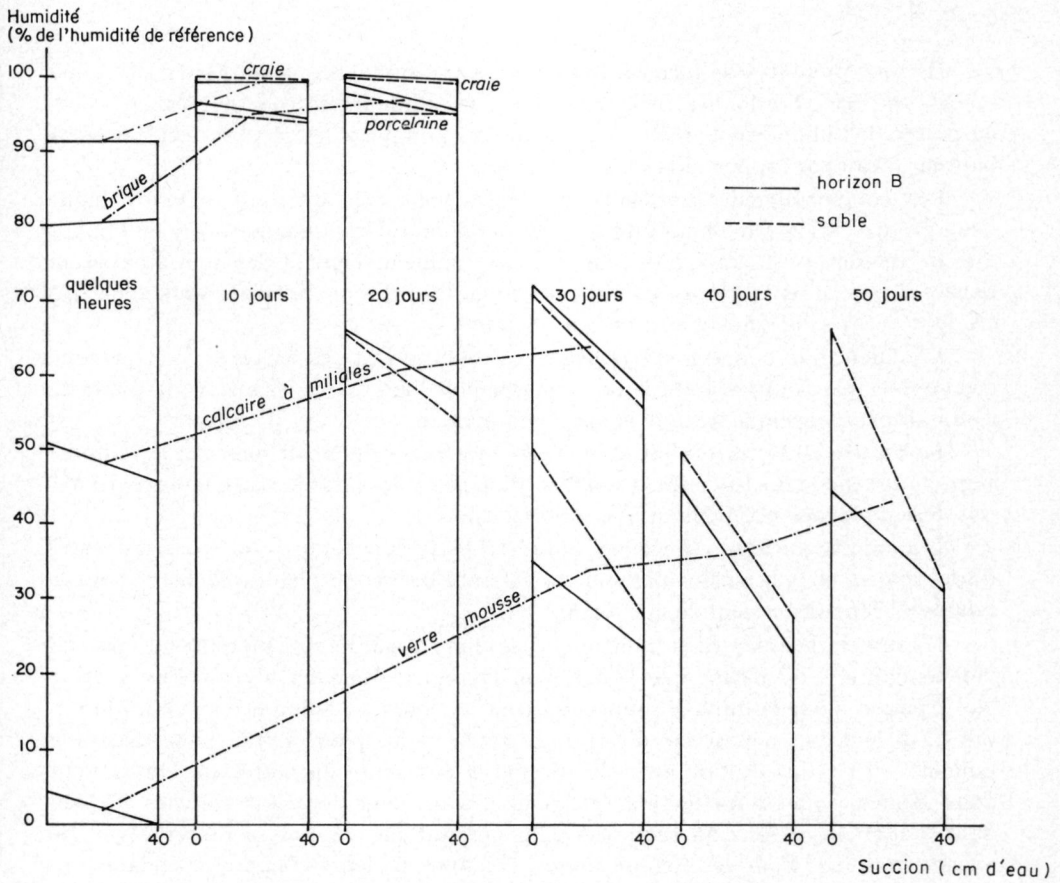



FIG. 41. — *Résultats de l'humectation dans l'appareil de Haines*

de terre que l'on tasse soigneusement, puis l'élément grossier que l'on recouvre ensuite de terre tassée. L'expérience commence lorsque la succion est ajustée à la valeur prévue.

Comme terre, nous avons utilisé, en plus du sable de Fontenay, un matériau plus sableux, le sable de Fontainebleau, et un plus argileux, la terre de l'horizon B de Versailles dont la granulométrie est donnée dans le tableau 4.

Le sable de Fontainebleau est constitué essentiellement de grains de diamètre supérieur à 100 μ. Le sable de Fontenay a une texture plus fine que le matériau précédent, puisque 7 p. 100 de ses particules ont un diamètre inférieur à 50 μ. A la différence des autres matériaux qui ont une structure particulaire, l'horizon B de Versailles a une structure fragmentaire, obtenue ici artificiellement (agrégats de diamètre compris entre 200 μ et 2 mm) ; 88 p. 100 de ses particules ont un diamètre équivalent inférieur à 50 μ.

Les sols à texture grossière sont difficiles à humecter, lorsque l'eau est soumise à une succion supérieure à 45 cm de hauteur d'eau. Nous avons donc utilisé des tensions inférieures à cette valeur qui, au centre de gravité de l'élément rigide étaient de 3,7 à 43,7 cm d'eau et, à la base du büchner, de 0 et 40 cm d'eau.

L'humidité des éléments rigides a été mesurée en général 10, 20, 30, 40 et 50 jours après le début de l'humectation. On dispose cependant, pour certains matériaux, de mesures d'humidité faites quelques heures après le début de l'humectation.

On a pris comme humidité de référence l'humidité du même échantillon submergé à la pression atmosphérique avec précaution en un jour, puis laissé ainsi pendant 30 jours. Les résultats des expériences sont exprimés sous la forme du rapport entre l'humidité observée et l'humidité de référence.

### 5. 12. *Résultats.*

Ils sont présentés de façon à faire apparaître l'influence des différents facteurs étudiés (fig. 41) ; l'ordonnée des points représente l'humidité des matériaux grossiers en p. 100 de l'humidité de référence. En abscisse, on porte les succions exprimées en hauteur d'eau par rapport à la base du büchner.

Les comportements des éléments rigides sont très différents. On distingue deux groupes selon que l'humidité est supérieure ou inférieure à 90 p. 100 de l'humidité de référence : la craie, la brique et la porcelaine atteignent des humidités supérieures à ce seuil en 10 jours au plus ; les humidités des autres matériaux sont très en deçà de ce seuil, même au bout de 50 jours.

L'influence de la succion à laquelle est soumise l'eau de la terre n'est presque pas appréciable pour les matériaux se remplissant bien ; pour les autres, la quantité d'eau absorbée diminue lorsque la succion augmente.

La nature de la terre n'intervient pas en général de façon sensible, le remplissage étant cependant légèrement meilleur dans le sable. Pour le verre mousse, toutefois, le remplissage est meilleur avec l'horizon B.

L'humidité augmente de façon appréciable avec le temps pour tous les matériaux rigides, mais la valeur plafond est atteinte beaucoup plus rapidement pour le groupe d'éléments se remplissant bien.

L'examen de la figure 41 montre que les effets des différents facteurs ne sont pas indépendants, c'est-à-dire que l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre ; par exemple, pour la durée d'humectation de 20 jours, la différence entre les humidités aux succions 0 et 40 cm d'eau n'est pas la même pour la craie et le calcaire à milioles : il y a interaction entre la succion et la nature du matériau. On ne peut donc étudier l'effet d'un facteur que pour des niveaux définis des autres. Cependant, l'effet de certains facteurs est prépondérant par rapport à l'interaction qui existe entre eux. Pour ceux-ci, du moins, l'examen de leurs effets indépendamment des niveaux des autres facteurs conserve un sens.

Les facteurs principaux sont rangés par influence décroissante : la nature des matériaux grossiers poreux, le temps et enfin la succion pour les matériaux s'humectant difficilement.

### 5. 2. — *Expériences en tubes avec circulation de l'eau*

Ces expériences, qui reproduisent en partie certaines conditions du milieu naturel, sont destinées à étudier l'action du temps et de la façon de fournir l'eau à la terre sur l'humectation des corps poreux rigides.

#### 5. 21. *Dispositif expérimental et méthode.*

On a utilisé les tubes pleins de sable de Fontenay, déjà décrits (section 1. 1).

L'eau était apportée à chaque tube de façon à réaliser :

— une infiltration suivie de filtration, avec lame d'eau à la surface. Comme on ne peut procéder à des mesures non destructrices de l'humidité du sable, celle-ci n'est pas connue directement. Pendant l'infiltration, le sable est certainement saturé au voisinage de la surface, mais il n'en est certainement pas ainsi au voisinage du front humide, puisque, en moyenne, 75 p. 100 de la porosité sont occupés par l'eau. Une fois la phase d'infiltration terminée, l'humidité du sable est voisine de la saturation ;

— une humectation verticale sans plan d'eau. Les dosages d'humidité du sable effectués à la fin de l'expérience et qui constituent, de ce fait, seulement des évaluations des valeurs réelles, donnent des humidités pondérales variant entre 17 et 21 p. 100 au voisinage de l'élément grossier. A ces valeurs correspondent respectivement 54 et 66 p. 100 de la porosité et une succion de 30 à 40 cm d'eau. Lorsque l'eau s'écoule de la base du tube, l'humidité du sable est plus élevée et voisine de la saturation, la disparition de la succion due au sol sec provoquant une augmentation de l'humidité dans le sable.

— une humectation horizontale, l'alimentation en eau se faisant par un tube coudé dont une extrémité plonge dans un récipient à niveau constant (cf. section 1. 61). Les mesures faites à la fin de l'expérience indiquent des humidités de 22 et 24 p. 100 au voisinage de l'élément, ce qui correspond à 78 et 84 p. 100 de la porosité totale et à une succion de l'ordre de 35 cm d'eau. Les humidités au voisinage de la zone d'alimentation sont supérieures à ces valeurs, et c'est l'inverse pour la terre proche du front humide.

Certaines expériences ont duré 10 jours, d'autres 30 jours. Il faut remarquer que, lorsqu'on fait varier la durée des expériences, on met en jeu des variations d'humidité du sable au cours de l'expérience, puisque, comme on l'a vu ci-dessus, en humectation verticale par exemple, l'humidité du sable augmente une fois que le front humide a atteint la base du tube.

Dans le même ordre d'idée, la durée du contact entre l'élément grossier et le sable humide est mal définie. Du fait de la vitesse finie d'avancement du front humide dans le sable, cette durée de contact n'est pas la même pour les différentes parties de l'élément rigide ; elle est évidemment plus longue pour la partie touchée la première par le front humide. Par ailleurs, le front humide dans le sable avance à des vitesses différentes selon les conditions d'alimentation en eau. Il n'est donc pas possible de disposer de durées de contact comparables entre le sable humide et l'élément grossier. Nous avons dû nous contenter de faire en sorte que le temps écoulé entre l'instant où le front humide aborde l'élément et la fin de la manipulation soit de deux heures environ.

Les éléments poreux rigides, en général des prismes à base carrée (2 × 2 × 4 cm), étaient placés dans les tubes au sein du sable, de façon que leurs axes de symétrie longitudinaux coïncident avec ceux des tubes.

#### 5. 22. *Résultats.*

5. 221. *Influence du mode d'humectation.* On a rassemblé dans le tableau 5 les résultats des expériences de courte durée (2 à 5 heures). Les résultats des humectations directes avec précaution (mesures au pycnomètre, 1re partie section 3.1) sont rappelés dans ce tableau.

D'une façon générale, les humectations qui se font par l'intermédiaire du sable aboutissent à des teneurs en eau analogues et donc indépendantes des procédés employés.

La quantité d'eau absorbée par la craie est à peu près constante, quel que soit le type d'humectation.

Les matériaux autres que les billes de verre, rangés par humidité croissante, se classent de la même façon, qu'on les humecte directement ou par l'intermédiaire du sol ; dans ce cas, l'emprisonnement d'air est accentué par rapport à l'humectation directe.

TABLEAU 5

*Teneur en eau des échantillons* (p. 100 de la porosité ouverte) *après des humectations de genre différent*

Durée : 2 à 5 heures

| Mode d'humectation | Matériau | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Craie (0,8 μ) | Brique (24,5 μ) | Calcaire à milioles (250 μ) | Verre mousse (500 μ) | Billes de verre (1 000 μ) |
| Humectation directe avec précaution | 91,7 | 75,7 | 33,0 | 17,3 | 100 |
| Tube : Humectation verticale, sans plan d'eau | 92,5 | 71,8-72,0 | 26,8 | 0,8-0,8 | |
| Tube : Infiltration verticale, plan d'eau en surface | 91,0 | 73,2 | | 1,6 | 0 |
| Tube : Humectation horizontale | 91,2-99,5 | | | | |
| Büchner succion 40 | 92,6 | 78,4 | 26,1 | 0,7 | |
| Büchner succion 0 | 92,7 | 77,2 | 28,9 | 3,3 | |

Les billes de verre se comportent de façon radicalement différente selon que l'humectation est directe ou non.

5. 222. *Influence de la durée.*

Pour l'élément s'humectant le plus mal, le verre mousse, on a augmenté la durée de contact, puisqu'elle pouvait améliorer le remplissage.

Quel que soit le mode d'humectation, l'humidité de l'élément grossier croît avec le temps dans des proportions considérables (tabl. 6).

Mais l'influence de la durée n'est pas indépendante du mode d'alimentation en eau du sable :

— pour une durée de 10 jours, la quantité d'eau absorbée est plus élevée dans le cas d'infiltration — filtration que dans celui de l'humectation verticale ;

— on obtient à peu près le même résultat avec une humectation verticale de 10 jours et une humectation en büchner de 30 jours à succion nulle.

### 5. 3. — *Discussion des résultats*

Examinons d'abord les expériences de courte durée du tableau 5. Sauf pour les billes de verre, la plus ou moins grande propension des matériaux à l'emprisonnement d'air (liée au rayon maximum des pores : première partie section 3. 13.) explique une partie des différences de remplissage constatées.

TABLEAU 6

*Teneur en eau du verre mousse*
(% de la porosité ouverte)

| Durée | Fourniture d'eau au sable | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Humectation verticale, sans plan d'eau | Infiltration, filtration, plan d'eau | Büchner | |
| | | | Succion 40 | Succion 0 |
| 2 à 5 heures | 0,8 — 0,8 | 1,6 | 0,7 | 3,3 |
| 10 jours | 12,1 | 21,4 | | |
| 30 jours | | | 7,6 | 11,4 |

Pour rendre compte de la part de différences inexpliquées, il faut faire intervenir la succion exercée par les matériaux grossiers. Seuls ceux de leurs pores assez fins pour exercer une succion supérieure à celle produite par le sable se remplissent. Si le rayon maximum des pores est élevé (brique, calcaire à milioles, verre mousse), une partie des pores seulement se remplit d'eau ; le cas extrême est celui du massif de billes de verre qui n'absorbe pas d'eau en quantité appréciable parce que ses pores sont trop larges. A l'inverse, pour un matériau tel que la craie, même les pores les plus larges exercent une succion (2 185 cm d'eau) largement supérieure à celle à laquelle est soumise l'eau du sable (quelques dizaines de cm d'eau) : la craie se remplit donc presque totalement et d'une façon indépendante de la succion appliquée à l'eau du sol tant qu'elle n'excède pas 2 185 cm d'eau.

Cette indépendance a été vérifiée avec la brique dont les pores les plus larges exercent une succion de 62 cm d'eau : lorsqu'on augmente la succion appliquée à l'eau du sable, la brique absorbe une quantité d'eau indépendante de celle-ci, tant qu'elle reste inférieure à 60 cm d'eau environ ; au-delà de cette valeur la quantité d'eau absorbée diminue rapidement (fig. 42).

Comme les matériaux à pores étroits se remplissent rapidement et presque complètement, la durée de l'expérience n'a pas d'influence appréciable. Par contre, pour les matériaux à pores larges, la quantité d'eau absorbée croît avec le temps. Des explications plausibles ont déjà été données : diffusion de l'air dans l'eau (première partie, section 3. 212.), variations de température d'autant plus probables que le temps écoulé est plus long (première partie, section 2. 26).

Le remplissage plus élevé du verre mousse placé dans le tube en filtration peut s'expliquer par une transmission convenable de la pression hydrostatique (l'humidité du sable est plus proche de la saturation) qui favoriserait l'expulsion de l'air (première partie, section 3. 212.) et ou par l'entraînement de l'air dans l'eau en circulation dans les capillaires, l'air parvenant à ces capillaires par diffusion.

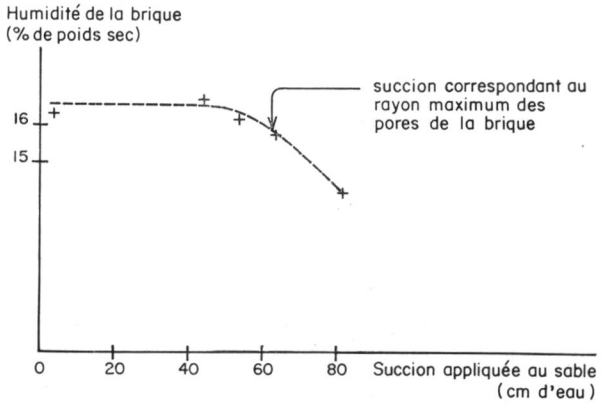



FIG. 42. — *Influence de la succion appliquée au sable sur l'humectation de la brique*

### 5. 4. — *Conclusions sur l'humectation des éléments grossiers poreux*

La nature de l'élément grossier explique une grande partie des différences de remplissage : le diamètre des pores les plus larges de chaque matériau permet de les classer en deux groupes.

Les matériaux à pores de petit diamètre se remplissent rapidement et de façon presque complète, indépendamment de la succion appliquée à l'eau de la terre (pour la gamme étudiée).

Lorsque le diamètre de leurs pores est plus grand, les matériaux se remplissent plus lentement et d'une façon d'autant plus incomplète que la succcion appliquée à la terre est plus élevée. Le degré de remplissage de ces éléments augmente avec le temps et lorsque l'eau est en mouvement dans la terre.

## VI. — HUMECTATION D'UN SOL CAILLOUTEUX

Nous examinons maintenant de façon globale le problème de l'humectation d'une épaisseur de sol sec par une quantité d'eau apportée en surface. Un certain temps après l'apport d'eau, la position du front humide se stabilise, ce qui correspond à une humidité constante de la terre $H_1$, la capacité au champ ; l'humidité des cailloux atteint également un équilibre. Ce sont les relations entre la quantité d'eau apportée et les paramètres de cet équilibre que nous étudierons.

Une lame d'eau d'épaisseur U (mm) apportée à la surface d'un sol sec amène une épaisseur $h$ (dm) de ce sol à l'humidité $H_1$ (p. 100 de poids sec) telle que

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1,$$

$d_a$ étant la densité apparente du sol (HÉNIN, 1969).

### 6. 1. — *Cailloux inertes du point de vue hydrique*

Lorsque les cailloux sont inertes du point de vue hydrique, parce qu'ils ne sont pas poreux ou n'absorbent pas d'eau quoique poreux, on modifie l'expression précédente en substituant à la densité apparente ($d_a$) la densité apparente partielle de terre fine ($d_{ap}$), la nouvelle épaisseur humectée étant $h'$, telle que :

$$U = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1$$

La densité apparente partielle de terre fine est le poids de terre fine contenue dans l'unité de volume de sol en place (BOURRIER, 1959). Une même quantité d'eau U humecte une épaisseur $h$ de sol sans cailloux et une épaisseur $h'$ du même sol contenant des cailloux.

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1 = d_{ap} \cdot h' H_1 \text{ donne } h/h' = d_{ap}/d_a$$

Comme $d_{ap} < d_a$, $h' > h$. Par exemple, pour $d_a = 1{,}3$ et $d_{ap} = 0{,}8$ $h' = 1{,}6 \cdot h$

Quelle que soit la nature de la terre fine, la présence de cailloux inertes augmente l'épaisseur de sol humectée par une certaine quantité d'eau.

La densité apparente partielle de terre fine dépend de la densité apparente de terre fine et de la proportion en volume de cailloux dans le sol.

### 6. 2. — *Cailloux actifs du point de vue hydrique*

A l'unité de volume de sol en place correspondent :

— un poids de terre fine $d_{ap}$ qu'on amène à l'humidité $H_1$ ;

— un poids de cailloux $d_{cp}$ qu'on amène à l'humidité $H_c$, $d_{cp}$ étant la densité apparente partielle de cailloux (GRAS, 1962-1969).

En faisant l'hypothèse que terre fine et cailloux s'humectent simultanément, on a :

$$U = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h' \cdot H_c$$

Pour le même sol sans cailloux, on aurait :

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1$$

Une profondeur $h$ de sol sans cailloux et $h'$ de sol caillouteux sont humectées par la même quantité d'eau U.

$$U = d_a \cdot h \cdot H = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h' \cdot H_c = (d_{ap} \cdot H_1 + d_{cp} H_c)\, h' ;$$

$$\text{d'où } h/h' = d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a)\,(H_c/H_1)$$

Cette formule générale englobe celle qui a été obtenue en 6·1, puisque pour l'obtenir il suffit d'écrire que l'humidité de l'élément grossier est nulle ($H_c = 0$).

Le rapport $h/h'$ dépend de plusieurs paramètres :

$$h/h' < 1 \quad \text{pour} \quad d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a)\,(H_c/H_1) < 1$$

$$h/h' > 1 \qquad\qquad d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a)\,(H_c/H_1) > 1$$

et quoique $d_{ap}/d_a$ soit toujours inférieurs à 1, il est difficile de tirer des conclusions simples de l'examen de cette expression.

On aborde le problème d'une autre façon, en substituant à un volume apparent unité de sol un caillou de même volume : on perd ainsi l'humidité volumique $d_a \cdot H_1$ et on gagne $d_c H_c$, $d_c$ étant la densité apparente du caillou. C'est la comparaison de $d_c \cdot H_c$ et de $d_a \cdot H_1$ qui donnera le sens de la variation

$$\begin{aligned} -d_a \cdot H_1 + d_c H_c &> 0 \quad \text{gain d'humidité volumique} \\ &= 0 \quad \text{invariance d'humidité volumique} \\ -d_a H_1 + d_c H_c &< 0 \quad \text{perte d'humidité volumique} \end{aligned}$$

Par exemple, la présence dans un sol ($d_a = 1{,}3$ ; $H_1 = 20$) de cailloux pour lesquels $d_c = 2{,}0$ $H_c = 5$, va diminuer le volume de pores occupables par l'eau, la même quantité d'eau humectera alors une épaisseur plus grande de sol que s'il n'y avait pas de cailloux, puisque $-1{,}3 \cdot 20 + 2 \cdot 5 < 0$. Par contre, l'apport de cailloux crayeux ($d_c = 1{,}5$ ; $H = 24$) augmente le volume de pores utilisables, puisque $-1{,}3 \cdot 20 + 1{,}5 \cdot 24 > 0$ ; la même quantité d'eau humectera une profondeur moindre de sol.

Ainsi, la valeur par rapport à 1 de l'expression $-d_a \cdot H_1 + d_c H_c$ permet de prévoir si $h/h'$ est inférieur, supérieur ou égal à 1.

En d'autres termes, si le volume pouvant être effectivement rempli par l'eau est plus important dans l'unité de volume apparent de cailloux que dans celui de terre fine, la présence de cailloux diminue la profondeur de sol humectée ; c'est évidemment l'inverse lorsque l'ordre ci-dessus est changé.

Les formules précédentes donnent des ordres de grandeurs parce que, d'une part terre fine et éléments grossiers ne s'humectent pas forcément à la même vitesse et que, d'autre part, elles ne tiennent pas compte de l'influence éventuelle des dimensions des éléments grossiers sur leur degré de remplissage.

## SUMMARY


### EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

### II. — DYNAMICS OF WATER IN A FINE-EARTH/COARSE CONSTITUENTS SYSTEM POSITIVE MOISTURE CHANGES

A pebble-containing soil is a heterogeneous system consisting of two materials, *i. e.*, fine earth and pebbles, also described as coarse constituents.

The dynamics of water in such a system has been investigated experimentally using tubes filled with sandy soil containing coarse constituents of definite geometrical shape.

The effects of these tubes on the kinetics of the moist front creeping forward in an initally dry soil under different water supply conditions, *i. e.*, horizontal influx, vertical or horizontal moistening are investigated. Experimental data were evaluated in the simpler instances on the basis of the laws of hydrodynamics.

After wetting the system, the effect of the coarse constituents on the conveyance of the water by the system is gone into. All constituents curtail the aggregate permeability of the system.

During previous experiments the coarse porous constituents may be moistened by the sand. The variational moisture recorded arises from the nature of the coarse constituents and from the water sucked in by the sandy soil and coarse constituents.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE DINAMYK DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENEN WASSERS

### II. — DYNAMIK DES WASSERS IN EINER MISCHUNG VON FEINERDE UND GROBEN BESTANDTEILEN : POSITIVE FEUCHTIKEITSCHWANKUNGEN

Ein Boden, der Kieselsteine enthält, stell ein uneinheitliches System dar, das aus zweierlei Arten von Materie besteht, nämlich aus der Feinerde und den Kieselsteinen, die auch als grobe Bestandteile bezeichnet werden.

Die Dynamik des Wassers in einem solchen System wurde experimentell untersucht, wobei Röhren benutzt wurden, die mit sandigem, grobe Bestandteile von definierter geometrischer Form enthaltendem Boden gefüllt waren.

Zunächst wurde deren Einfluss auf die Kinetik der einen ursprünglich trochenen Sandboden durchdringenden Feuchtigkeit intersucht, und zwar unter verschiedenartigen Bedingungen der Tränkung mit Wasser : Planmässige Infiltration, vertikale und horizontale Befeuchtung. Die Untersuchungsergebnisse wurden in den einfachen Fällen an Hand der Gesetze der Hydrodynamik ausgedeutet.

Nach erfolgter Befeuchtung der Mischung wurde die Einwirkung der groben Bestandteile auf die Ausbreitung des Wassers in der Mischung untersucht. Sämtliche Bestandteile verringern die Gesamtdurchlässigkeit der Mischung.

Im Verlauf der vorausgehenden Versuche konnten die porösen groben Bestandteile sich vom Sand aus mit Feuchtigkeit tränken. Die Schwankungen der registrierten Feuchtigkeit beruhen auf der Natur der groben Bestanditeile sowie auf der von dem Sandboden und den groben Bestandteilen ausgeübten Wasseraufsaugung.

## РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.

II. Динамика влаги в системе мелкая почва — крупные элементы : положительные изменения влажности.

Р. ГРА.

Почва заключающая щебень представляет гетерогенную систему состоящую из двух материалов : мелкой почвы и щебня, называемого также иногда крупными элементами. Динамика влаги в такого рода системе изучалась в экспериментах с применением колонок песчаной почвы, заключавшей крупные элементы определенных геометрических форм.

Сперва изучалось их влияние на кинетику фронта смачивания, передвигающегося в исходно сухой песчаной почве, при разлиных условиях водного питания : инфильтрация при поверхностном напоре, горизонтальное или вертикальное увлажнение. Результаты опытов интерпретировались в простых случаях при помощи законов гидродинамики.

В увлажненной системе рассматривалось действие крупных элементов на передачу влаги системой. Все элементы уменьшают ее водопроницаемость.

В пред' идущих опытах крупные пористые элементы увлажнялись от песка. Зарегистрированные изменения влажности зависят от природы крупных материалов, и от всасывающей силы песчаной почвы и крупных элементов.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Bourrier J., 1959. *Problèmes posés par la présence de cailloux dans les sols irrigués.* Ministère de l'Agriculture. Direction générale du Génie rural et de l'Hydraulique agricole. Imprimerie nationale.

Collis-George S., Hénin S., Kelly J.-A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **273**, 242-244.

Courau M., 1967. Modalités de l'infiltration de l'eau dans un milieu poreux : effet de la force de succion. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, série D, 862-865.

Courau M., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans des milieux poreux artificiels. *Ann. agron.*, **20**, 5-14.

Féodoroff A., 1965. *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. Cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau en surface.* Thèse, Paris.

Gardner W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. *Highway research Board* SR 40, 78-87.

Gras R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.

Gras R., 1966. L'influence des matériaux poreux rigides sur la circulation de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sci.*, **266**.

Gras R., 1969. Les mesures de densités apparentes en sol caillouteux. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 9- 11.

Hénin S., Gras R. et Monnier G., 1969. *Le profil cultural*, 1 vol., Masson.

Schneebeli, 1966. *Hydraulique souterraine*, 1 vol., Eyrolles.

Swartzendruber D., 1969. The flow of water in unsaturated soils. In J. M. de Wiest (1969). *Flow through porous media.* 1 vol, Academic Press.

De Wiest J. M., 1969. Fundamental principles of ground-water flow in : De Wiest. *Flow through porous media*, 1 vol., Acedamic Press.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (3), 317-332.

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA SENSIBILITÉ AU COMPACTAGE DE MATÉRIAUX MEUBLES EN FONCTION DE LEUR COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

A. FAURE et J.-C. FIÈS

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

L'etude de la sensibilité des sols au compactage est abordée, au laboratoire, à l'aide de mélanges binaires d'argile (kaolinite) et de sables.

Chaque mélange a permis de réaliser deux types d'échantillons qui diffèrent par l'énergie mise en jeu au cours de leur préparation :

échantillons préparés par malaxage manuel,
échantillons portés à l'optimum Proctor.

L'influence de ces deux traitements a été appréciée au niveau de la densité apparente sèche des échantillons et de la porosité d'arrangement des particules du squelette. Dans ce dernier cas, les données obtenues sont confrontées à celles calculées à l'aide d'un modèle théorique d'arrangement des particules constitutives des échantillons.

La comparaison de l'ensemble des résultats fait ressortir que, dans un matériau où la teneur en argile croît, la sensibilité au compactage, très marquée pour les mélanges pauvres en argile, décroît dans les échantillons moyennement argileux et disparaît pratiquement quand le matériau est riche en argile (35 p. 100).

La généralisation aux conditions de plein champ a été amorcée à l'occasion de chantiers de travaux publics conduits sur des terrains agricoles du Bassin parisien.

## INTRODUCTION

Les problèmes des relations entre la distribution granulométrique des sols et leur propriétés physiques ont été abordés dans un article précédent (HÉNIN *et al.*, 1970), au niveau de la porosité des matériaux meubles, cette propriété étant prise comme résultante globale de la disposition relative des particules au niveau des assemblages élémentaires. Ces assemblages élémentaires sont susceptibles, sous

l'effet de facteurs mécaniques, de subir des modifications plus ou moins marquées selon leurs textures et selon l'intensité des facteurs mis en jeu.

Au champ, les passages d'engins lourds sont à l'origine de contraintes s'exerçant sur le sol et, pour certains types de textures, les sols sablo-argileux par exemple, de telles actions peuvent leur conférer une compacité difficile à modifier par la suite.

Pour cette raison, nous avons amorcé une étude expérimentale du phénomène à l'aide d'échantillons fabriqués par mélange d'une argile et de particules grossières. Chaque mélange a alors subi deux traitements différents et indépendants faisant intervenir des énergies de grandeurs et d'origines totalement différentes, d'une part un compactage dynamique nécessitant un développant de 6 kg.cm/cm³ et d'autre part un malaxage manuel relativement doux. Ces traitements aboutissent à la création d'un échantillon présentant une structure continue dont la porosité est essentiellement liée aux caractéristiques dimensionnelles des particules et à leur disposition relative (FIÈS, 1971).

L'influence de ces deux méthodes de compactage a été appréciée par la mesure des densités apparentes. Sur la base de ces mesures, des études antérieures ont mis en évidence :

— le rôle prépondérant tenu par l'argile au cours du compactage d'un échantillon qui se trouve dans un certain état d'humidité (FAURE, 1971) ;

— la possibilité de caractériser l'arrangement des particules du squelette par leur porosité matricielle (FIÈS, 1971). Nous rappelons que la porosité matricielle est définie comme étant le volume relatif laissé libre par le squelette.

## I. — CHOIX DU MATÉRIAU

Pour éliminer toute influence incontrôlable liée à la forme des grains du squelette et à la nature de l'argile nous avons préféré des sols artificiels à des sols naturels. Ces matériaux ont été fabriqués par mélange d'un sable et d'une argile dans des proportions variables et éventuellement choisies.

En fait nous avons utilisé deux familles de mélanges binaires. Elles contiennent toutes les deux la même argile : une kaolinite provenant d'un sol du Perche et rendue calcique après son extraction. Le squelette sableux de la première famille, appartenant au faciès des sables de Fontainebleau est constitué d'éléments fins, celui de la deuxième famille est un squelette grossier appelé Sable de Brou. Les granulométries de ces deux squelettes sont les suivantes :

| | Fontainebleau (%) | Brou (%) |
|---|---|---|
| | — | — |
| Limon fin | — | 0,4 |
| Limon grossier | 0,15 | 2 |
| Sable fin | 65,6 | 9 |
| Sable grossier | 34,1 | 89 |

Chaque matériau obtenu par mélange est noté $FK_i$ ou $BK_i$ selon qu'il appartient à l'une ou à l'autre de ces familles. L'indice $i$ permet de distinguer dans une même famille deux matériaux de teneurs en argile (A p. 100) différentes. La fabrication de chacun d'entre eux a été effectuée en laboratoire à partir des constituants initiaux mis dans les proportion voulues par mélange dans une auge avec un excès d'eau. Une fois la pâte rendue aussi homogène que possible, le matériau obtenu est séché à 105° puis broyé et tamisé à 2 mm.

## II. — DESCRIPTION DES TRAITEMENTS ET RÉSULTATS OBTENUS

### 1. — *Compactage dynamique*

Ce compactage dynamique a été effectué selon les règles des essais Proctor utilisées en Travaux publics (PELTIER, 1959 ; TERZAGHI et PECK, 1961). Ces essais ont pour but de déterminer la densité apparente $\gamma_d$ (définie par le rapport du poids sec sur le volume du matériau à *l'état humide*) lorsque le matériau est à une teneur en eau $w$ p. 100 connue après compactage sous une énergie donnée. Pour tracer la courbe de variations de la densité apparente d'un mélange donné en fonction

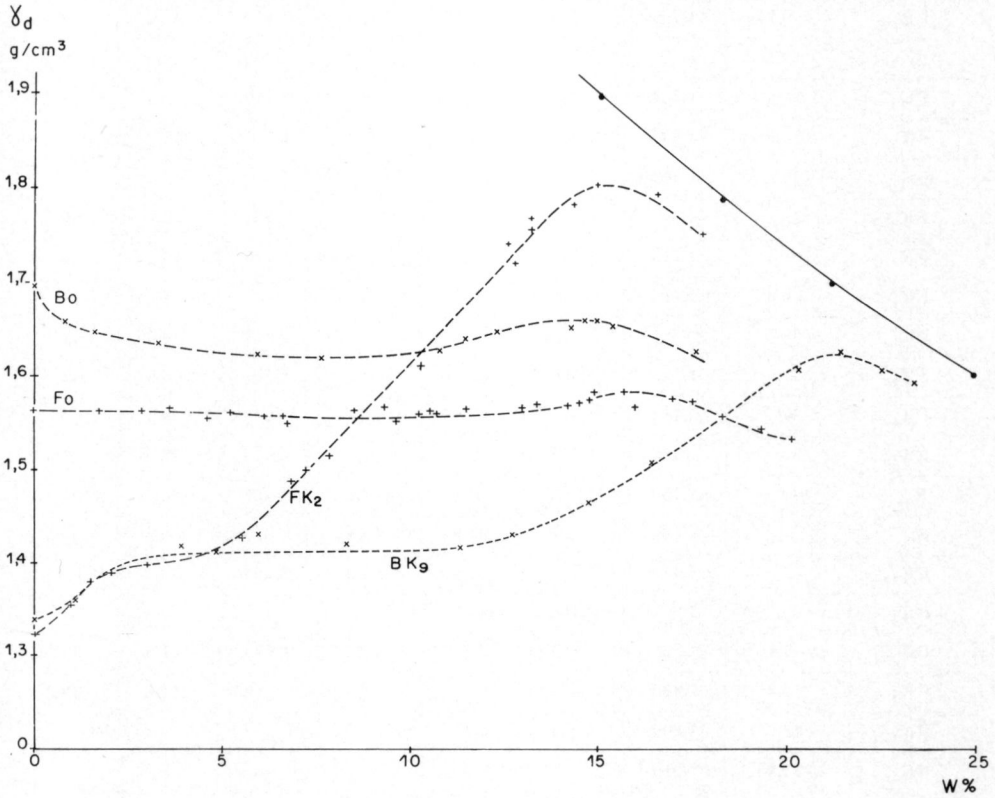



FIG. 1. — *Compactage dynamique*

de la teneur en eau (l'énergie utilisée étant toujours la même), chaque compactage a été effectué sur une nouvelle fraction de mélange. Nous étions ainsi assurés que la taille des agrégats initiaux était toujours la même. Le tracé de la courbe complète aurait nécessité une très grande quantité de matériau avec le moule standard dont le volume est de 950 cm³ environ. Nous avons donc utilisé un moule plus petit, de diamètre 70 mm, de hauteur 78 mm donnant ainsi un volume de 300 cm³. Pour

TABLEAU I

*Caractéristiques des familles FK et BK*

| Nom | A % | Compactage dynamique | | | Malaxage manuel | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\gamma_d$ | $\gamma'_d$ | $n'_{sq.}$ | $H_e$ | $\gamma'_d$ | $n'_{sq.}$ obs. | $n'_{sq.}$ th. |
| $F_0$ | 0 | 1,583 | 1,583 | 40,6 | 10,4 | 1,359 | 49 | 49 |
| $FK_7$ | 2 | — | — | — | 12,6 | 1,422 | 47,4 | 49 |
| $FK_4$ | 3,7 | 1,663 | 1,664 | 40,0 | 16 | 1,555 | 43,5 | 49 |
| $FK_{11}$ | 7,4 | 1,742 | 1,729 | 40,0 | 18,5 | 1,565 | 45,3 | 49 |
| $FK_{13}$ | 9,85 | 1,760 | 1,754 | 40,77 | 21 | 1,670 | 43,2 | 49 |
| $FK_1$ | 12,1 | 1,762 | 1,749 | 42,42 | 23,9 | 1,665 | 44,9 | 49 |
| $FK_9$ | 16,4 | 1,852 | 1,860 | 42,0 | 26 | 1,740 | 45,1 | 49 |
| $FK_2$ | 24 | 1,800 | 1,815 | 48,0 | 37,3 | 1,746 | 49,9 | 49 |
| $FK_{14}$ | 26,2 | 1,762 | — | — | — | — | — | — |
| $FK_{28}$ | 28 | — | — | — | 41,2 | 1,734 | 52,8 | 49 |
| $FK_8$ | 31,4 | 1,715 | 1,773 | 54,45 | 46,8 | 1,774 | 54,1 | 49 |
| $FK_{12}$ | 36,6 | 1,633 | 1,742 | 58,39 | — | — | — | — |
| $FK_{38}$ | 38 | — | — | — | 53 | 1,715 | 59,8 | 53,5 |
| $FK_3$ | 47,2 | 1,520 | 1,650 | 67,4 | 63,2 | 1,725 | 65,6 | 63 |
| $FK_6$ | 62 | 1,412 | 1,577 | 77,56 | — | — | — | — |
| $FK_{10}$ | 71 | 1,350 | 1,579 | 82,85 | 86,8 | 1,600 | 82,6 | 82 5 |
| $K_0$ | 100 | 1,150 | 1,404 | 100 | 122,5 | 1,429 | 100 | 100 |
| $B_0$ | 0 | 1,660 | 1,660 | 37,9 | 10,4 | 1,610 | 39,3 | 39,3 |
| $BK_{13}$ | 3,4 | 1,759 | 1,734 | 37,2 | 14,2 | 1,685 | 38,5 | 39,3 |
| $BK_7$ | 5,5 | 1,804 | 1,766 | 37,5 | — | — | — | — |
| $BK_{10}$ | 7,1 | 1,824 | 1,804 | 37,2 | 18,2 | 1,670 | 41,3 | 39,3 |
| $BK_2$ | 11,3 | 1,880 | — | — | 22,6 | 1,750 | 41,4 | 39,3 |
| $BK_{11}$ | 12,0 | 1,892 | 1,854 | 38,9 | — | — | — | — |
| $BK_{14}$ | 15,95 | 1,910 | — | — | — | — | — | — |
| $BK_8$ | 18,7 | 1,868 | 1,865 | 43,13 | 31,0 | 1,750 | 46,2 | 39,3 |
| $BK_4$ | 23,8 | 1,814 | 1,852 | 47,1 | — | — | — | — |
| $BK_3$ | 25,2 | 1,786 | | | — | — | — | — |
| $BK_6$ | 30,9 | 1,762 | 1,816 | 53,0 | 45,0 | 1,845 | 51,8 | 45,3 |
| $BK_9$ | 39,9 | 1,620 | 1,721 | 61,26 | 55,0 | 1,725 | 60,8 | 55,0 |
| $BK_{12}$ | 51,5 | 1,494 | 1,634 | 70,4 | 67,5 | 1,685 | 69,1 | 66.5 |

conserver l'énergie standard de 6 kg · cm par cm³, nous avons utilisé une dame de 1 kg dont la hauteur de chute est de 20 cm. L'échantillon est compacté en trois couches pour assurer une certaine homogénéité de la densité, à raison de 30 coups par couche.

La figure 1 donne quelques exemples de courbes de variations des densités des mélanges BK et FK dont le tableau 1 donne les caractéristiques granulométriques et les résultats que nous utiliserons par la suite. Ces courbes conduisent à plusieurs constatations :

1. La variation de la densité apparente pour tous les mélanges présente un coude aux faibles teneurs en eau. La teneur en eau correspondante augmente en fonction de la teneur en argile.

2. La densité apparente passe par une valeur maximale pour une teneur en eau caractéristique. Ce maximum, appelé « Optimum Proctor » dépend de la teneur en argile et de la nature du squelette utilisé. Il est vraisemblable qu'il dépend également des propriétés gonflantes de l'argile (FAURE, 1971).

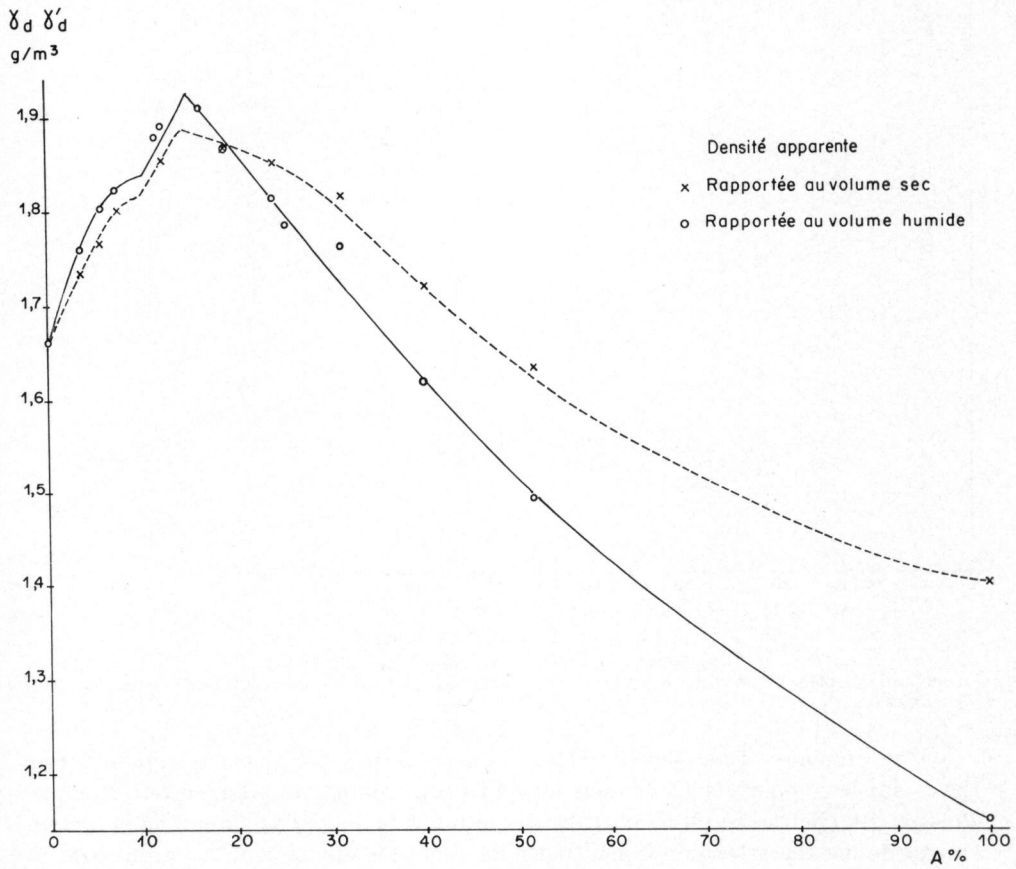



FIG. 2. — *Compactage dynamique*
Variation de la densité apparente famille FK
La courbe en trait plein est obtenue à partir des considérations théoriques ; les points représentent les résultats expérimentaux.

3. Au-delà du maximum les courbes ont une allure hyperbolique. Le mélange en effet est de plus en plus saturé en eau, et la courbe de variation devient asymptotique à la courbe de saturation totale.

Si les faits mis en évidence dans l'alinéa 1 méritaient d'être soulignés, nous ne retiendrons cependant, pour la suite de cette étude, que les valeurs des densités apparentes maximales de chaque mélange. De ce fait nous nous plaçons dans des conditions extrêmes de compactage par rapport à celles obtenues par malaxage manuel.

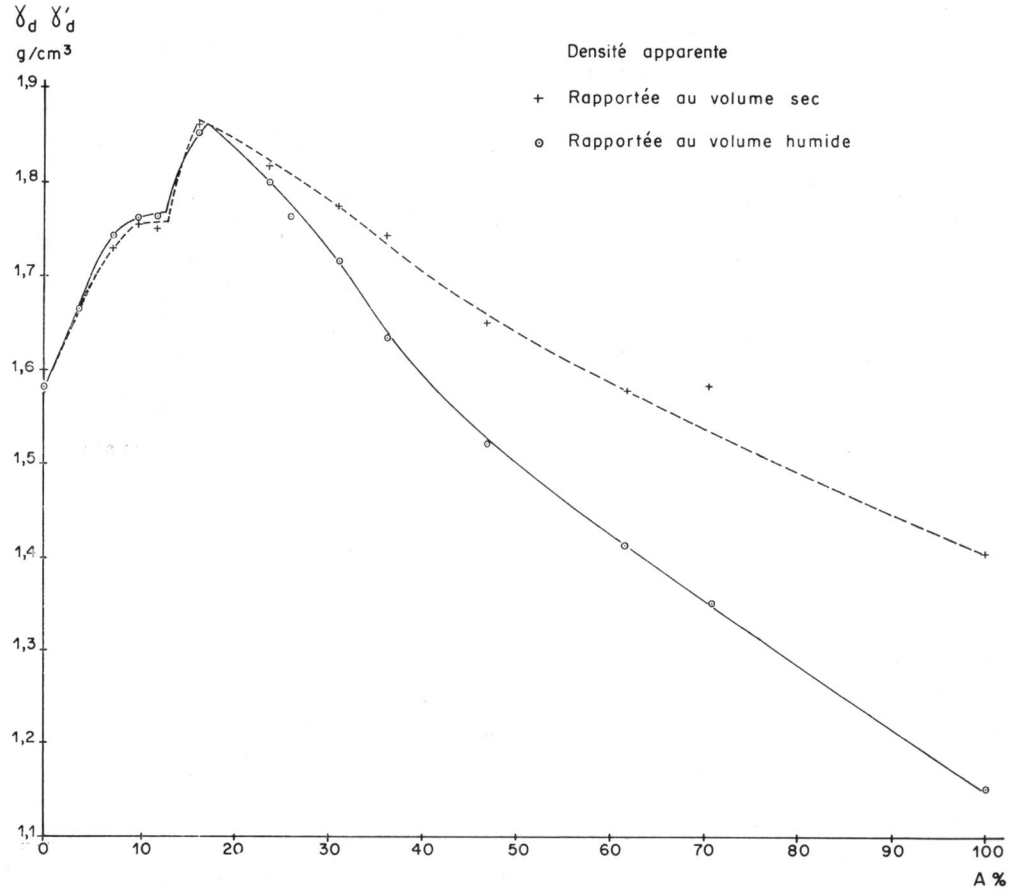



FIG. 3. — *Compactage dynamique*
Variation de la densité apparente famille BK
La courbe en trait plein est obtenue à partir des considérations théoriques, les points représentent les résultats expérimentaux.

Une première étude (FAURE, 1971) nous a permis d'avancer quelques hypothèses sur le comportement des sols lorsqu'ils sont compactés selon cette technique Proctor. En effet les résultats obtenus en mesurant la densité apparente et la teneur en eau de mélanges binaires constitués d'un squelette donné et d'une argile (kaolinite) ont mis en évidence l'existence, dans l'échantillon, d'une eau qui n'a pu être absorbée par l'argile gonflée au maximum et que nous avons appelée « eau excédentaire ». Pour justifier la présence de cette eau dans l'échantillon, nous avons

considéré qu'elle était nécessaire pour favoriser l'arrangement des grains. Ce rôle donné à l'eau excédentaire nous a suggéré la notion de potentiel de lubrification dont la loi règne sur le mécanisme de compactage de tels mélanges.

Mais les résultats obtenus et la théorie avancée ne concernent que les échantillons à l'état humide. Afin de mieux comprendre le processus d'arrangement des particules constitutives du matériau, nous avons examiné les échantillons après leur séchage dans une étuve, à 105°. Nous en avons mesuré la densité apparente « sèche » $\gamma'_d$ (poids sec rapporté au volume de l'échantillon à *l'état sec*) dont les valeurs numériques sont portées dans le tableau 1. Les figures 2 et 3 représentent les variations expérimentales de cette densité apparente $\gamma'_d$ en fonction de la teneur en argile, pour les deux familles de mélanges. Sur ces mêmes graphiques nous avons porté les variations expérimentales et théoriques de la densité apparente rapportée au volume de l'échantillon à l'état humide ($\gamma_d$) conformément aux hypothèses avancées au cours de notre précédente étude (FAURE, 1971). La comparaison des compacités de chaque mélange à deux états d'humidité bien distincts est ainsi plus immédiate.

Ces figures, ainsi que le tableau 1 montrent qu'une fois séchés, les échantillons gardent une trace des effets des trois types de lubrification que nous avons proposés. De ce fait nous retrouvons, pour les échantillons secs, les trois phases mises en évidence sur les échantillons humides.

### 2. — *Malaxage manuel*

Ce mode de traitement des mélanges a été emprunté au protocole mis au point par KHEYRABI et MONNIER (1968). Ce protocole précise que la condition nécessaire d'homogénéité du matériau est réalisée par malaxage à la main, avec une forte spatule, en présence d'une quantité d'eau optimale H*e* p. 100 (tabl. 1) obtenue en multipliant par 1,9 l'humidité équivalente calculée par la formule de GRAS (1957). La durée du malaxage a été limitée à 10 mn pour éviter une trop grande dessiccation. La pâte obtenue a été ressuyée sur Büchner pendant cinq heures puis séchée à 105°.

Notons que pour ces conditions de préparation, les auteurs ont vérifié qu'un comportement aussi global que la stabilité structurale, appréciée sur des échantillons ainsi préparés, était analogue à celui du matériau prélevé sur place et ayant la même granulométrie. Ce résultat nous autorise à considérer le malaxage manuel comme reproduisant l'état naturel du sol en structure continue, en l'absence de toute contrainte autre que celle liée aux facteurs naturels.

Après pesée des échantillons séchés, la détermination du volume apparent sec des échantillons a nécessité leur imperméabilisation à l'aide d'un vernis. Celle-ci rend ainsi possible la mesure de la poussée d'Archimède qu'ils subissent lorsqu'ils sont plongés dans l'eau, l'irrégularité des formes présentées excluant toute mesure directe. Ces résultats nous ont permis de calculer les valeurs des densités apparentes sèches $\gamma'_d$.

Une première interprétation globale des mesures de densités peut être tentée au niveau de la disposition relative des constituants, en se référant à un modèle d'arrangement dont la théorie a été exposée antérieurement (HÉNIN, FIÈS et MONNIER, 1970). D'après ce modèle théorique basé sur l'hypothèse de la non perturba-

tion de la disposition des constituants d'une classe quand la seconde est introduite au cours d'un mélange, la porosité matricielle reste inchangée jusqu'à ce que l'argile introduite occupe avec sa porosité propre tous les espaces libres ménagés entre les grains du squelette. Au-delà de ce seuil, les échantillons présentent une phase argileuse continue. La porosité matricielle croît alors en fonction de la teneur en argile : un volume apparent d'argile se substituant à un même volume réel de squelette.

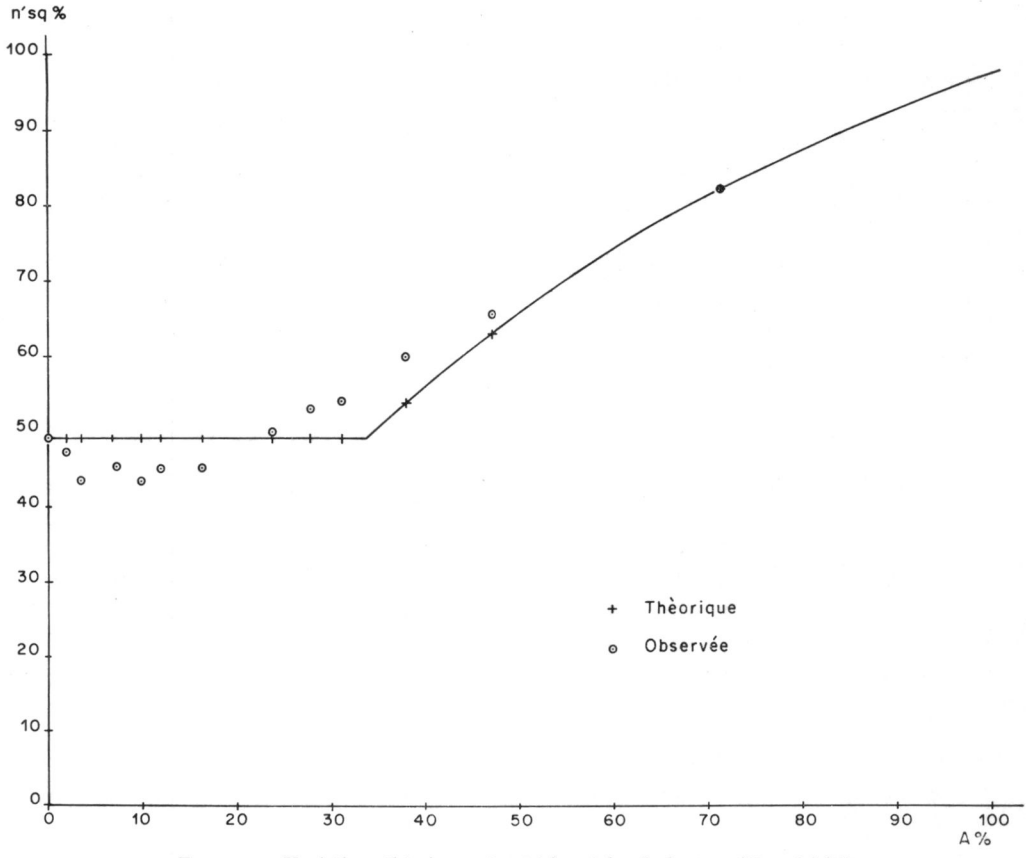



FIG. 4. — *Variations théoriques et expérimentales de la porosité matricielle*
Échantillon FK, après séchage

La confrontation de cette hypothèse aux résultats expérimentaux obtenus sur des mélanges d'argiles et de squelettes variés a montré que l'introduction d'une phase argileuse conduit à une perturbation de l'arrangement des grains du squelette se traduisant en général par un accroissement de la porosité matricielle dès les faibles teneurs en argile. Plus précisément, pour les échantillons étudiés à sec, ce phénomène se manifeste dans un domaine de teneurs en argile s'étendant entre 5 p. 100 et 80 p. 100 environ. Ce fait expérimental a entraîné l'introduction dans le modèle d'un coefficient dit « coefficient de perturbation ». La recherche de la signification physique de ce coefficient a montré que la perturbation dans l'arran-

gement des particules est liée à une disposition préférentielle sur la surface des particules du squelette d'une partie de l'argile introduite dans les mélanges. Pour les teneurs en argile inférieures à 5 p. 100 ou supérieures à 80 p. 100 l'hypothèse d'arrangement proposée par le modèle paraît se vérifier et permet de conclure dans le premier cas à une localisation de l'argile entre les grains et dans le second cas à la réalisation d'une phase continue d'argile.

Nous avons reporté dans le tableau I les valeurs expérimentales obtenues et les données théoriques calculées que nous utiliserons par la suite : densité apparente sèche $\gamma'_d$, porosités matricielles $n'_{sq}$. observées et calculées.

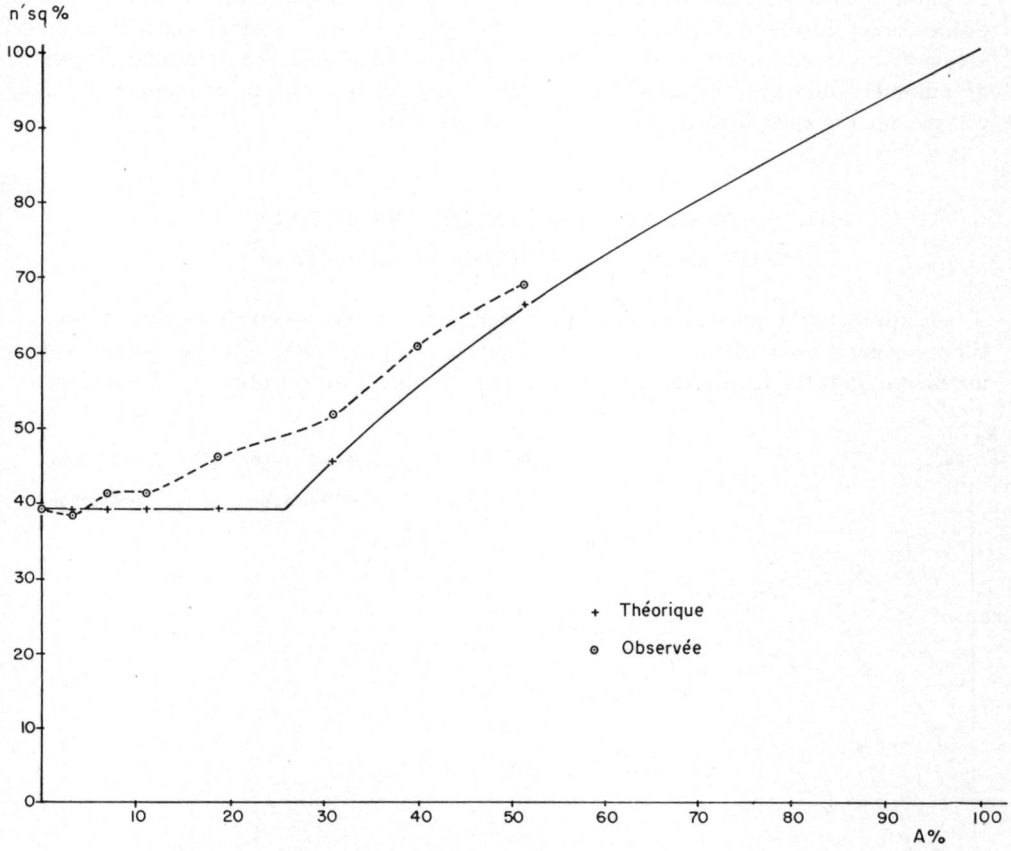



FIG. 5. — *Variations théoriques et expérimentales de la porosité matricielle*
Échantillon BK, après séchage

Les figures 4 et 5 représentent les variations théoriques et expérimentales de la porosité matricielle des échantillons à l'état sec, en fonction de la teneur en argile pour les mélanges $BK_i$ et $FK_i$.

Nous constatons que les échantillons de la famille BK se comportent comme l'ensemble des familles déjà étudiées. Pour une teneur en argile donnée supérieure à 5 p. 100, la porosité matricielle observée est toujours supérieure à la valeur calculée. Par contre, la famille FK présente pour des teneurs en argile inférieures à 20 p. 100, des porosités matricielles expérimentales inférieures aux valeurs théo-

riques et qui passent par un minimum. Au-delà de 20 p. 100, les valeurs observées deviennent supérieures aux valeurs calculées conformément au comportement général des mélanges binaires. Nous disposons dans cet intervalle d'un échantillon riche en argile ($FK_{10}$ à 71 p. 100 d'argile) qui nous permet de remarquer que les valeurs expérimentales de la porosité matricielle tendent à se rapprocher des valeurs théoriques et que nous sommes alors en présence d'une phase continue d'argile.

Le fait le plus marquant demeure la diminution de la porosité matricielle présentée par la famille FK. Ce fait suggère un réarrangement des particules du squelette vers un état plus compact que celui présenté par le squelette nu. Ceci ne paraît pas fondamentalement en contradiction avec le processus d'enrobement proposé. Cet enrobement éliminerait les forces de frottement s'opposant à la réalisation d'un arrangement serré. Ce dernier est sans doute lié aux caractéristiques granulométriques propres au squelette utilisé qui pourrait être lui-même considéré comme un mélange binaire de sables fin et grossier.

## III. — MISE EN COMMUN DES RÉSULTATS COMPARAISON DES COMPORTEMENTS

L'approche la plus immédiate pour comparer les comportements des échantillons soumis aux deux traitements précédemment décrits est de porter sur un même graphique (fig. 6) les valeurs des densités apparentes $\gamma'_d$ des échan-

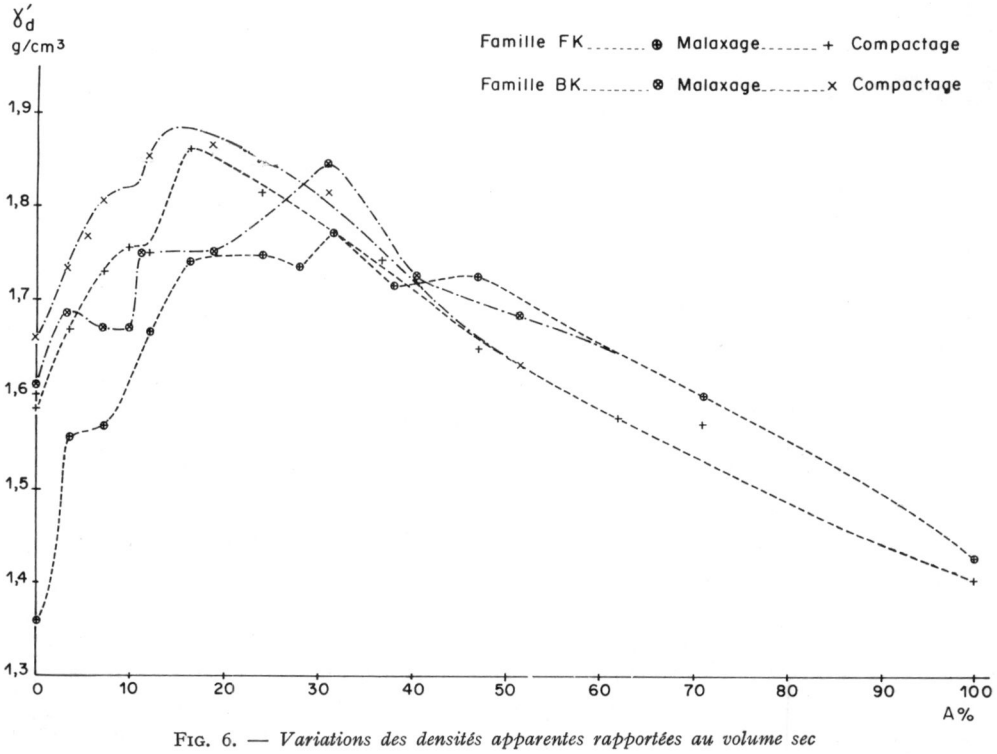



FIG. 6. — *Variations des densités apparentes rapportées au volume sec*

tillons une fois séchés. Le graphique met en évidence les trois points principaux suivants :

— aux teneurs en argile inférieures à 30 p. 100 environ, le compactage dynamique donne, comme une logique immédiate le laisserait prévoir, des valeurs des densités bien supérieures à celles obtenues avec l'autre traitement ;

— au-delà de 30 p. 100, il est remarquable de constater que les traitements ne se différencient plus et il apparaît même, lorsque la teneur en argile devient importante, que les valeurs les plus élevées de $\gamma'_d$ sont obtenues après malaxage manuel.

En première approximation, cette différence peut être considérée comme systématique, bien qu'elle reste relativement faible, au-delà de 30 p. 100 d'argile. Elle semble pouvoir se rapporter au développement constaté, en raison de la taille de l'échantillon et de la technique de dessiccation, de fissures entraînant une surestimation de la valeur du volume apparent sec après compactage dynamique.

Compte tenu de cette remarque, la convergence entre les valeurs de $\gamma'_d$ obtenues après les deux traitements sur l'argile pure (échantillon $K_0$) démontre que les énergies mises en jeu restent inférieures à celles qui auraient pu entraîner un réarrangement des particules argileuses elles-mêmes.

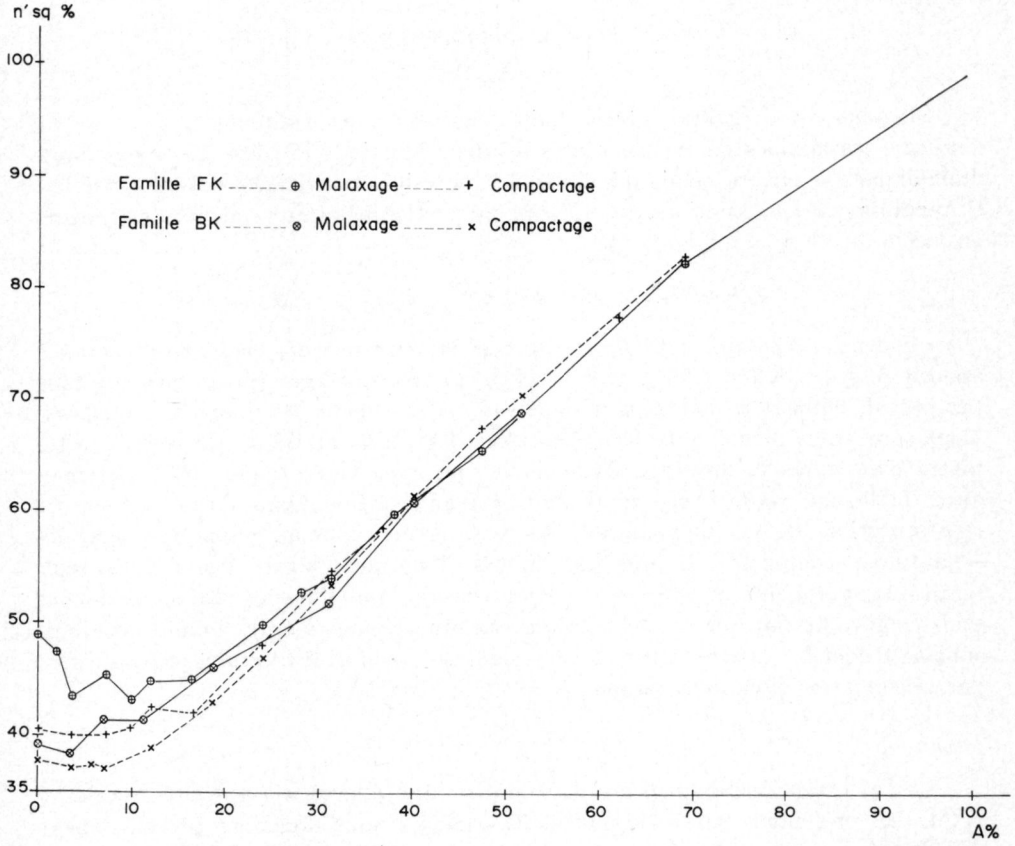



FIG. 7. — *Évolution comparée des porosités matricielles des échantillons malaxés ou compactés*

Pour faire une comparaison plus approfondie des comportements, nous avons préféré utiliser le paramètre porosité matricielle $n'_{sq}$. des échantillons séchés. La figure 7 en traduit les variations en fonction des teneurs en argile, pour chaque traitement et pour chaque famille.

Ce graphique fait apparaître trois comportements distincts des mélanges.

### 1. — *Teneurs en argile inférieure à 18 p. 100 environ*

Dans ce cas les effets des deux traitements sont distincts, le compactage dynamique conduisant aux plus faibles valeurs de la porosité matricielle. Pour chacun de ces traitements les deux familles ont quantitativement des comportements différents, mais le classement des familles ne paraît pas lié aux méthodes de compactage : les porosités matricielles de la famille FK étant toujours supérieures à celles de la famille BK.

Alors que les valeurs des porosités matricielles des deux familles permettent de retrouver l'existence des deux premières phases de lubrification mises en évidence précédemment par compactage dynamique, nous pouvons constater qu'il est impossible d'affirmer que ces deux phases existent après malaxage manuel.

### 2. — *Teneurs en argile comprises entre 18 p. 100 et 35 p. 100 environ*

Si, dans ces domaines intermédiaires, les effets des traitements sont encore distincts, les familles ont perdu toutes les deux leur individualité. Le compactage dynamique est encore celui qui donne les porosités matricielles les plus faibles. Il apparaît que les variations de $n'_{sq}$. sont proportionnelles aux valeurs des teneurs en argile.

### 3. — *Teneurs en argile supérieures à 35 p. 100 environ*

Ce dernier domaine est caractérisé par la tendance des deux traitements à aboutir à des valeurs de $n'_{sq}$. très proches. Le compactage dynamique n'a donc pas plus d'effet que le malaxage manuel sur l'arrangement des grains du squelette. Nous constatons même, avec les échantillons $FK_3$, $FK_6$ et $BK_{12}$, que les porosités matricielles après compactage dynamique sont plus élevées que celles obtenues après malaxage manuel, ce qui traduit la manifestation, dans notre système de représentation, de la surestimation des valeurs des volumes apparents secs des échantillons compactés. Il nous est difficile d'affirmer, sur la vue de ces seuls résultats expérimentaux, que les variations de $n'_{sq}$. sont linéaires, car nous devons tenir compte du fait que ces échantillons ont été préparés à l'état humide et qu'ils subissent donc les arrières-effets des phénomènes de lubrification qui se traduisent par une relation pseudo-hyperbolique (FAURE, 1971).

*Remarque.*

Le tableau 2 donne un ordre de grandeur des valeurs des porosités totales à l'état sec, présentées par les échantillons dans les trois domaines précédemment définis.

Ces résultats font clairement ressortir que la porosité totale, dans une famille de mélanges, est tout d'abord fonction de la proportion des constituants et que l'effet d'un compactage ne peut se révéler que par rapport à une valeur de référence des porosités. La nécessité du choix d'une référence souligne l'intérêt général de la mise au point du traitement par malaxage qui permet de définir une porosité texturale à partir de laquelle il est possible de situer les modifications physiques de l'état du sol.

TABLEAU 2

*Porosités totales des échantillons à l'état sec*

| | A % | 0 | 3,7 | 7,4 | 9,85 | 12,1 | 16,4 | 24 | 31,4 | 47,2 | 71 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FK | Malaxage | 49 | 41,2 | 40,6 | 36,4 | 36,5 | 32,9 | 32,6 | 31,2 | 31,1 | 35,7 | 41,2 |
| | Compactage | 40,6 | 37,4 | 34,5 | 33,5 | 33,6 | 29,1 | 30,5 | 31,7 | 35,3 | 36,6 | 42 |

| | A % | 0 | 3,4 | 7,1 | 11,3 | 18,7 | 30,9 | 39,9 | 51,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BK | Malaxage | 39,3 | 36,1 | 36,5 | 33,2 | 32,8 | 28,4 | 32,4 | 33,4 |
| | Compactage | 37,9 | 34,8 | 31,8 | | 28,9 | 30,1 | 33,1 | 35,8 |

## CONCLUSION

Le but poursuivi par cette étude est de mettre en évidence les effets de l'application de deux types de contraintes fort différents sur des modèles de sols constitués par des mélanges binaires d'argile et de squelette. Les premiers résultats obtenus ici à partir d'un choix limité à un seul type d'argile (kaolinite) et à deux squelettes sableux ont permis de décrire le comportement des échantillons en utilisant notamment le paramètre de porosité matricielle qui rend compte de façon globale de la disposition des grains du squelette.

Nous avons pu ainsi montrer qu'un matériau où la teneur en argile varie ne paraît pas également sensible aux effets d'un compactage dynamique. Par rapport à un malaxage manuel ce domaine de sensibilité semble ici se limiter aux teneurs en argile inférieures à 35 p. 100 environ, les effets les plus nets du compactage se manifestant entre 0 et 18 p. 100 d'argile. Au-delà du seuil de 35 p. 100, dans ce qu'il est commun d'appeler les terres argileuses, les différences entre les effets du compactage dynamique et ceux du malaxage manuel semblent peu perceptibles.

Une application pratique de ces premières considérations concerne l'estimation des dégâts consécutifs au passage dans une terre humide d'un véhicule lourde-

ment chargé et laissant derrière lui des ornières. Deux cas sont donc à considérer :

— s'il s'agit d'une terre argileuse, l'ornière, souvent profonde, est simplement la conséquence du déplacement du matériau lui-même sans compactage notable ;

— par contre, dans le cas de terres sablo-argileuses, l'ornière, même moins marquée, traduit une augmentation de la compacité du matériau.

L'ornière, parfois impressionnante, créée dans le premier cas entraînerait par un jugement trop hâtif des conclusions erronnées. Les dégâts causés sont en fait plus importants dans le deuxième cas où les propriétés physiques du matériau, notamment sa porosité, ont été modifiées plus profondément. Une illustration nous en a été donnée par l'étude des modifications des densités apparentes sèches $\gamma'_d$ déterminées sur une série d'échantillons à structure continue, prélevés entre 0 et 30 cm de profondeur, sur des chantiers de travaux publics installés en plein champ. Il convient de noter que les mesures ont été effectuées un an après la fin des travaux.

Le tableau 3 permet de comparer les résultats des échantillons prélevés hors chantier et sur chantier dans deux exemples de sols présentant des granulométries différentes.

TABLEAU 3

*Caractéristiques des sols in situ*

| Parcelle I | | | | Parcelle II | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Granulométrie (%) | Prof. de prélèvement (cm) | $\gamma'_d$ | | Granulométrie (%) | Prof. de prélèvement (cm) | $\gamma'_d$ | |
| | | HC * | C ** | | | HC * | C ** |
| 0-2 µ 11<br>2-20 µ 18 | 5-15 | 1,69 | 2,01 | 0-2 µ 57<br>2-20 µ 23 | 0-20 | 1,78 | 1,81 |
| 20-50 µ 27<br>50-2 000 µ 43 | 15-25 | 1,69 | 1,95 | 20-50 µ 12<br>50-2 000 µ 6 | 20-30 | 1,75 | 1,74 |

* Hors chantier.
** Chantier.

Nous pouvons constater que les changements de compacité sont, conformément aux résultats obtenus à l'aide des familles FK et BK, plus marqués pour la parcelle I qui correspond à un sol sablo-argileux. Ces modifications n'ont pas un caractère temporaire et sont difficilement effacées malgré les façons culturales appropriées.

De telles vérifications *in situ* justifient largement les études entreprises au laboratoire sur l'aptitude au compactage des sols.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE COMPACTION SENSITIVITY OF LOOSE MATERIALS ACCORDING TO THE PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION

A study of the compaction sensitivity of soils was carried out in the laboratory with a binary mixture of clay (kaolinite) and sands.

Each mixture provided two types of test portions that differed by the energy involved in the mixing process, as follows :

i) hand-mixed ;
ii) compacted to the Proctor's maximum.

The effect of both treatments was evaluated in all test portions by studying the variation of the dry apparent bulk density, with regard to the porosity distribution of the component particles.

On the other hand the experimental data have been compared with those obtained from the arrangement of particles according to an equivalent theoritical pattern.

The comparison of the test data shows that, as the clay content of a material increases, compaction sensitivity, which is high when clay content is low, decreases when it is intermediate and virtually disappears when high (35 p. 100).

This observation had been verified by the way of civil engineering works which were carried out in the field on agricultural land in the Parisian Basin.



## ZUSAMMENFASSUNG

### EXPERIMENTALE UNTERSUCHUNG DER EMPFINDLICHKEIT ZUR VERDICHTUNG VON KOCEREN ERDEN IN ABHÄNGIGKEIT IHRER GRANULOMETRISCHEN ZUSAMMENSETZUNG

Die Untersuchung der Empfindlichkeit der Böden zur Verdichtung wird im Laboratorium mit Hilfe von binären Mischungen aus Ton (Kaolinit) und Sand erörtert.

Jede Mischung gab zwei verschiedene Typen von Stichproben, die durch die im Laufe ihrer Herstellung eingesetzte Energie voneinander abweichen :

— Stichproben durch Handkneten hergestellt,
— Stichproben, die bis zum Optimum proctor gebracht wurden.

Des Einfluss diesser zwei Behandlungsarten wurde auf der Ebene der scheinbaren trockenen Dichte der Stichproben und der Anordnungsporosität der Skeletteilchen beurteilt. In diessem letzten Falle werden die erhaltenen Ergebnisse mit jenen gegenübergestellt, die mit Hilfe eines theoretischen Anordnungsmusters der Aufbauteilchen der Stichproben berechnet wurden.

Des Vergleich der gesamten Ergebnisse zeigt, dass in einem Boden mit wachsenden Tongehalt die Empfindlichkeit zur Verdichtung, welche für die Mischungen mit wenig Ton sehr markiert ist, in den mittelmässig tonigen Stichproben abnimmt und fast null wird, wenn der Boden reich an Ton ist (35 p. 100).

Aus Anlasse von Strassenbauten, die auf landwirtschaftlichen Gebieten des Pariser Beckens unternommen wurden, wird eine Verallgemeinerung diesdr Beobachtungen auf offenem Felde vorgenommen.

## РЕЗЮМЕ

Экспериментальное изучение чувствительности рыхлых материалов к уплотнению в зависимости от их гранулометрического состава.

А. ФОР, Ж. К. ФИЕС.

С помощью бинарных смесей глины (каолинит) и песка проведено было изучение, в лабораторных условиях, чувствительности почв к уплотнению.

Из каждой смеси получено было два типа образцов различавшихся знергией приложенной при их изготовлении :

— образцы полученные с помощью ручного разминания;

— образцы изготовленные при оптимальном значении проктора.

Влияние этих двух способов приготовления рассматривалось на уровне об'емного веса каждого образца и порозности расположения частиц скелета. В этом последнем случае, полученные данные сравнивались с данными, вычисленными при пощи теоритической модели расположения частиц составляющих образец.

Сравнение всех результатов показывает что в материалах с увеличивающимся содержанием глины, чувствительность к уплотнению очень сильна для смесей со слабым содержанием глины, уменьшается в образцах средне-глинистых, и практически не существует, когда материал содержит 35 % глины. Обобщение в применении к поле вым условиям, предпринято на участках общественных работ проводящихся на сельскохозяйственных почвах Парижского Бассейна.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


FAURE A., 1971. Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification. *Ann. agron.*, **22** (5), 487-513.

FIÈS J. C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.*, **22** (6), 655-685.

GRAS R., 1957. In *Le profil cultural.* Masson et C^ie^, Paris, 1969.

HÉNIN S., FIÈS J.-C., MONNIER G., 1970. Étude théorique de la porosité des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *C. R. Acad. Sci.*, **271**, 1960-1963.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1963. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

PELTIER R., 1959. *Manuel du laboratoire routier.* Dunod, Paris.

TERZAGHI K., PECK R. B., 1961. *Mécanique des sols appliquée.* Dunod, Paris.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (3), 333-354.

# ÉTUDE DE QUELQUES ASPECTS DE LA FIXATION DU FER PAR LES ACIDES HUMIQUES (1)

P. JAMBU, Thérèse DUPUIS et J. DUPUIS

*Faculté des Sciences,*
*Laboratoire de Pédologie,*
*Route de Chauvigny, 86 - Poitiers*

## RÉSUMÉ

Nous avons étudié les conditions de fixation du fer par les acides humiques de sols hydromorphes calciques. Quand on met ces acides en contact avec une solution de chlorure ferrique, il se forme, selon les conditions, des complexes colloïdaux pseudo-solubles dispersés dans la phase liquide ou bien un floculat plus ou moins riche en fer. Le fer « lié » correspond à la totalité du fer associé à la matière organique tant à l'état floculé qu'à l'état d'hydrosol dispersé. Le fer « dispersable » représente la fraction du fer lié à la matière organique floculée qui passe en phase liquide sous l'action de la soude. La quantité de fer lié varie avec le pH et la concentration initiale en fer. En milieu sodique, neutre ou alcalin, la dispersion des composés humo-ferriques augmente avec le pH, la dilution et la teneur en sodium ; le complexe flocule progressivement quand l'apport initial en fer augmente. Dans la fraction dispersable, la teneur en fer lié est constante et caractéristique de l'humus.

Les courbes d'analyse thermique différentielle sous oxygène permettent d'identifier un complexe ferreux et deux complexes ferriques caractérisés par leur température de pyrolyse par oxydation. Celle-ci atteint son maximum d'intensité vers 380°C pour le complexe ferreux et, respectivement, vers 450°C et 480 °C pour les complexes ferriques. Le complexe ferrique caractérisé par un pic exothermique culminant à 480°C est moins riche en fer que celui qui s'oxyde vers 450°C. Ce dernier se forme aux pH élevés ($\geq$ 7). D'autre part, l'ATD montre que, dans le complexe floculé, la totalité de la matière organique liée au fer est détruite à plus basse température (280°-335°C).

Dans un complexe ferrique dispersé à pH 7, l'introduction de 50 à 60 p.p.m. de calcium provoque un début de floculation. Les courbes d'ATD montrent l'existence dans la pseudo-solution de complexe ferrique et d'humate de calcium.

(1) Travail réalisé dans le cadre de l'activité de l'Équipe de Recherche associée du C. N. R. S. n° 220, « Pédologie des Pays atlantiques ».

## I. — INTRODUCTION

Dans un précédent mémoire, nous avons exposé les résultats de recherches expérimentales sur les formes de liaison entre le fer et les *acides fulviques* (T. DUPUIS, JAMBU et J. DUPUIS, 1970 *b*). Nous avions travaillé à l'époque à l'aide de produits extraits de sols hydromorphes calciques. Nous étendons maintenant notre étude à des *acides humiques* extraits de ces mêmes milieux :

AM : Anmoor calcique longuement submergé d'Amuré (Deux-Sèvres),
LG : Anmoor calcique de la Grève-sur-le-Mignon (Charente-Maritime),
$MZ_3$ : Tourbe calcique à roseaux profonde de Le Mazeau (Vendée),

Nous avons travaillé, depuis le début de nos recherches, sur des sols hydromorphes où la dynamique du fer est spécialement active. La plupart des propriétés mises en évidence semblent posséder une valeur très générale. Cependant, certains essais effectués à partir d'humus de sols bruns acides du Limousin montrent la formation de composés organo-métalliques dont les températures de thermolyse sont légèrement différentes. Nous estimons donc prudent, dans un premier temps, de considérer que les résultats présentés ne sont strictement établis que dans les conditions où nous avons travaillé, c'est-à-dire dans le cas de sols hydromorphes calciques.

On sait que les acides humiques correspondent à une fraction relativement peu mobile de la matière organique du sol : on peut donc considérer que le fer qu'ils fixent est momentanément stocké sous une forme peu soluble. Nous verrons cependant plus loin qu'il convient de nuancer cette affirmation.

Les acides humiques mis en présence d'hydroxyde ferrique donnent par association des hydrosols humo-ferriques (DEMOLON et BASTISSE, 1938) dont la stabilité à l'état dispersé dépend des conditions de milieu et notamment de pH (ALEKSANDROVA, 1954). Ces hydrosols ne sont dispersés que dans un domaine de pH beaucoup plus étroit que celui de leurs homologues dérivés des acides fulviques ainsi que nous le verrons dans la suite.

Par ailleurs, les pouvoirs réducteur et complexant des acides humiques sont réputés moins élevés que ceux des acides fulviques correspondants (KONONOVA, 1961). Cependant, en raison de l'extrême abondance des acides humiques dans les sols hydromorphes (JAMBU, 1968), il est intéressant de connaître leur aptitude à fixer le fer et les conditions de stabilité ou de mobilité que présentent les composés formés. Nous avons étudié ce problème du point de vue quantitatif (taux de fer lié) et qualitatif (mode de liaison entre le fer et les acides humiques). Ce dernier aspect a été abordé surtout par analyse thermique différentielle.

Les propriétés physico-chimiques des acides humiques de chaque station dépendent évidemment de la nature de la fraction extraite et, par voie de conséquence, de la méthode d'extraction (DEB, 1949). Nous avons donc toujours travaillé de la même manière : extraction par le pyrophosphate de sodium 0,1 M, précipitation des acides humiques par l'acide chlorhydrique à pH 1, purification par dialyse acide, puis séchage à 35°C sous vide (T. DUPUIS, JAMBU et J. DUPUIS, 1970 *a*).

## II. — ÉTUDE QUANTITATIVE DE LA FIXATION DU FER PAR LES ACIDES HUMIQUES

Dans cette étude, nous avons dissous la poudre d'acides humiques dans de la soude N/50 et ajouté le fer sous forme d'une solution aqueuse de chlorure ferrique. Le pH est ajusté à la soude ou à l'acide chlorhydrique. Il convient de noter que, dans ces conditions, les acides humiques sont mis en présence de sodium et de fer.

Il est nécessaire de définir, au départ, « pouvoir réducteur » et « pouvoir complexant ».

### A. — *Pouvoir réducteur*

Les acides fulviques ont la propriété de transformer le fer ferrique en fer ferreux, même en présence d'air, dans certaines conditions. Nous l'avons montré dans le cas de tourbes et d'anmoors (T. DUPUIS, JAMBU et J. DUPUIS, 1970 *b*). Les acides humiques extraits des mêmes sols présentent également un pouvoir réducteur assez important à pH acide. Il est cependant toujours inférieur à celui que nous avions noté pour les acides fulviques correspondants : le pouvoir réducteur est assez fort à pH 3 (375 à 400 méq. de $Fe^{III}$ réduit par 100 g d'acides humiques), mais il devient faible à pH 4 et nul à pH 5. Rappelons que nous avons trouvé dans les mêmes sols un pouvoir réducteur supérieur à 500 méq. de $Fe^{III}$ réduit par 100 g d'acides fulviques à pH 3. Nous verrons plus loin qu'une partie au moins du fer ferreux ainsi produit est échangeable.

### B. — *Pouvoir complexant*

Nous entendons par « pouvoir complexant » la quantité maximum de fer ferreux ou ferrique susceptible d'être liée à un poids donné d'acides humiques, soit à l'état dispersé, soit à l'état floculé. Cette façon de voir est conforme aux idées d'ALEKSANDROVA *et al.* (1968).

Le terme de *complexe* généralement employé ne nous paraît pas ici parfaitement satisfaisant et il ne préjuge pas, dans notre esprit, du mode de liaison entre le fer et les acides humiques : il peut s'agir, selon les cas, de liaisons ioniques, de formation de véritables complexes ou encore de composés d'adsorption.

Quand on ajoute progressivement le chlorure ferrique dans la solution d'acides humiques en maintenant le pH à sa valeur initiale, le fer reste d'abord sous une forme *pseudo-soluble* liée à la matière organique. Puis, quand la quantité de fer ajouté atteint un certain seuil, il apparaît un floculat où peuvent coexister du fer lié aux acides humiques et de l'hydroxyde ferrique libre. A l'extrême, la totalité des acides humiques finit par floculer.

Selon KOVALEV et GENERALOVA (1967), si l'on traite ce floculat par la soude N/10 (à pH 12), on fait passer en phase liquide à l'état dispersé les complexes de fer et d'acides humiques tout en laissant floculé l'hydroxyde ferrique libre. Il est facile de contrôler, comme nous l'avons fait, qu'il ne subsiste pratiquement plus d'acides humiques dans le floculat, mais il est évident que KOVALEV et GENERALOVA admettent

un postulat initial : seul se trouve ainsi dispersé le fer précédemment lié à la matière organique. Nous avons d'ailleurs vérifié qu'une solution d'acides humiques à pH 12, mise au contact d'hydroxyde ferrique précédemment précipité, ne fait pas passer de fer en phase liquide.

En admettant au départ le postulat de KOVALEV et GENERALOVA, nous appellerons dans la suite *fer lié* la totalité du fer lié à la matière organique tant à l'état floculé qu'à l'état d'hydrosol dispersé. C'est en somme le « *pouvoir complexant* » défini plus haut.

D'autre part, nous appellerons « *fer pseudo-soluble* » la fraction du fer lié qui surnage au-dessus du floculat tant que la précipitation des acides humiques n'est pas totale.

Enfin, nous qualifierons de « *fer dispersable* » la fraction du fer floculé lié à la matière organique mais qui repasse en phase liquide sous l'action de la soude N/10.

1. *Variation de la quantité de fer lié aux acides humiques en fonction du pH et de la concentration en fer.*

Nous avons surtout travaillé à partir des acides humiques de l'anmoor LG. Nous avons pour cela repris, en l'améliorant, le protocole expérimental que KOVALEV et GENERALOVA avaient utilisé.

Les essais ont été systématiquement effectués sur 50 mg d'acides humiques solubilisés dans 50 ml de soude N/50. Après avoir ajouté la quantité voulue de chlorure ferrique en solution acide, nous avons ajusté le pH à différentes valeurs par la soude, porté le volume final de solution à 60 ml et laissé en contact pendant une semaine pour que l'équilibre de réaction soit atteint.

Quand nous avions simultanément une pseudo-solution et un précipité, nous les avons séparés par centrifugation. Puis le précipité a été soumis à des traitements successifs dans la soude N/10, suivis de centrifugation afin d'éliminer éventuellement l'hydroxyde ferrique libre. Nous avons ensuite dosé le fer et le carbone dans les fractions pseudo-solubles et dispersables.

Les complexes obtenus diffèrent selon la quantité de fer introduite et nous devons distinguer plusieurs cas.

a) *Pour un rapport initial fer/carbone faible* (inférieur à une valeur variable avec le pH mais comprise entre 400 et 750 méq. de fer pour 100 g d'acides humiques), il se forme seulement des complexes pseudo-solubles entre le fer et l'acide humique. Nous les avons obtenus en ajoutant progressivement la solution de chlorure ferrique jusqu'à atteindre un début de floculation.

Le maximum de fer pseudo-soluble augmente avec le pH (tabl. 1). Il est beaucoup plus élevé en milieu neutre et plus faiblement alcalin qu'en milieu acide, ce qui semble impliquer un mode de liaison différent avec la substance organique. Il est possible qu'aux valeurs plus élevées de pH un plus grand nombre de groupements fonctionnels carboxyliques participent à la liaison. Mais pour KAWAGUCHI et KYUMA (1959), ce serait plutôt la solubilité du complexe qui augmente. Selon ces auteurs, « les acides humiques tendent à précipiter au moment de la chélation. En milieu faiblement alcalin, ils seraient légèrement hydrolysés et se transformeraient en hydroxy-chélates solubles dans l'eau. L'hydrolyse serait même totale en milieu alcalin».

TABLEAU I

*Solubilité maximum du fer complexé en fonction du pH*

| pH | Fer pseudo-soluble (méq./100 g d'AH) | Concentration en fer de la phase liquide (p.p.m.) |
|---|---|---|
| 4 | 400 | 25 |
| 7 | 600 | 37 |
| 8 | 750 | 46 |

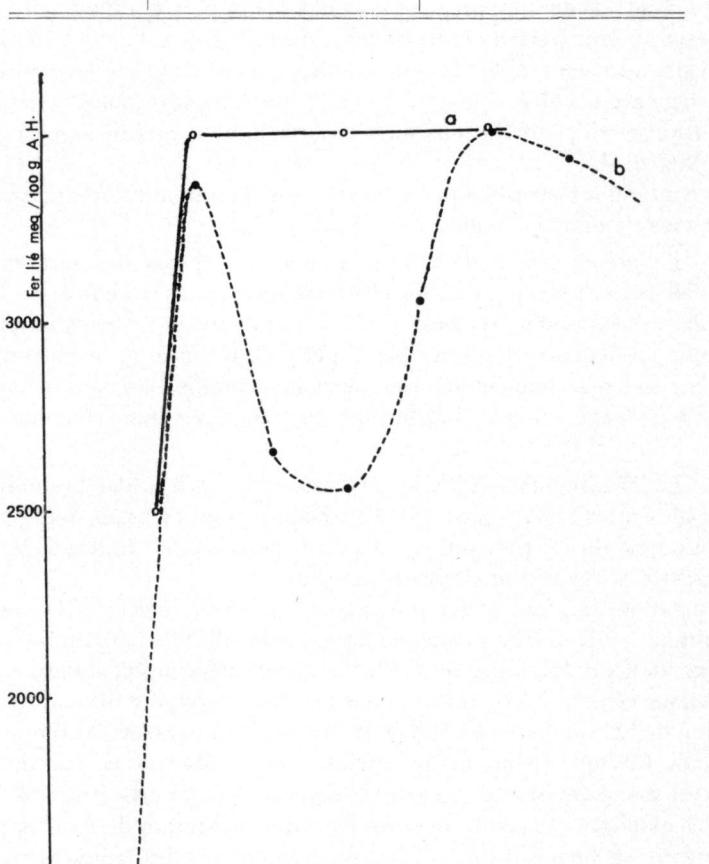



FIG. 1. — *Variation de la quantité de fer lié aux acides humiques en fonction du pH et de la quantité de fer introduite*

*a* : introduction de 3 800 méq. de $Fe^{III}$
*b* : introduction de 5 700 méq. de $Fe^{III}$

ALEKSANDROVA (1967) pense également que la solubilité du complexe augmente avec le pH, mais elle attribue le fait à la fixation d'ions $Na^+$ sur l'acide humique. Le potassium jouerait le même rôle tandis qu'en présence de calcium, le complexe resterait floculé.

b) *Pour un rapport initial fer/carbone plus élevé,* il apparaît un précipité. La précipitation est complète ou partielle selon la valeur du pH, le rapport Fe/C et la concentration globale en fer. Nous entendons par concentration globale le rapport entre la quantité de fer introduit et le volume total final.

— *En présence de 1 900 méq. de fer* pour 100 g d'acides humiques (concentration globale en fer : 294 p.p.m.), on obtient un précipité à toutes les valeurs de pH. A pH 2, tout l'acide humique est floculé mais la plus grande partie du fer reste soluble à l'état ionique (ferreux et ferrique). Entre pH 3 et 5, la phase liquide s'appauvrit progressivement en fer et celui qui y subsiste est sous forme ferreuse ; la matière organique demeure floculée. A partir de pH 5, un complexe humo-ferrique passe en pseudo-solution et devient de plus en plus abondant à mesure que la réaction du milieu est plus alcaline.

Le fer contenu à tout pH dans le floculat est lié à la matière organique et totalement dispersable dans la soude.

— *En présence de 3 800 méq. de fer* pour 100 g d'acides humiques (concentration globale en fer : 590 p.p.m.), les phénomènes sont assez analogues. Le précipité qui apparaît au-dessus de pH 3 est presque entièrement dispersable par la soude mais non plus totalement : par exemple, à pH 5, la totalité du fer introduit est bien précipitée, mais les 9/10 seulement en sont ensuite solubilisables dans la soude (fig. 1 *a*). En outre, le passage en pseudo-solution du complexe humo-ferrique ne débute qu'à pH 7.

— *En présence de 5 700 méq. de fer* pour 100 g d'acides humiques (concentration globale en fer : 884 p.p.m.), la dispersion du complexe ne débute qu'à pH 8. Une grande partie du fer précipité n'est pas dispersable par la soude N/10. D'autre part, la quantité de fer lié varie avec le pH (fig. 1 *b*).

La courbe de fixation du fer présente deux maximums, à pH 3 et 7, séparés par un minimum à pH 5. Elle a exactement la même allure lorsqu'on remplace l'acide humique par un acide fulvique. Seule l'intensité des maximums diffère. Ces résultats s'accordent avec ceux que KOVALEV et GENERALOVA (1967) ont obtenus. Ils observent un maximum de liaison du fer à pH 6 pour un acide humique et aux environs de pH 7 pour un acide fulvique. Nous avons, quant à nous, observé ce maximum à pH 7 dans les deux cas. KOVALEV et GENERALOVA (1967) n'ont pas étudié la fixation du fer à pH 3, région où nous avons observé un autre maximum de fixation.

Les teneurs en fer lié (tabl. 2) sont supérieures à celles trouvées par KOVALEV et GENERALOVA (1967). La divergence des résultats observés peut être due soit au mode opératoire (KOVALEV et GENERALOVA ont utilisé un procédé de filtration et non pas de centrifugation pour séparer le fer — à l'état d'hydroxyde — non solubilisé par la soude), soit à l'origine et à la nature différentes des composés humiques (LEVASHKEVICH, 1966).

Au-dessous de pH 2,5, le fer existe surtout à l'état d'ions $Fe^{+++}$ (ou $Fe^{++}$) en solution sans liaison avec la matière organique. Ce point, souligné par ALEKSANDROVA (1967), s'accorde bien avec le faible taux de fer lié que nous observons toujours dans ce domaine.

Au-dessus de pH 2,5, le fer peut exister à l'état d'ions hydroxylés colloïdaux chargés positivement, notamment $Fe(OH)_2^+$ et $Fe(OH)^{++}$. Il se forme d'abord, s'il y a peu de fer, des complexes pseudo-solubles entre la matière organique et ce métal. Ce seraient les « sels complexes hétéropolaires » étudiés par ALEKSANDROVA *et al.* (1968), où le fer serait engagé dans l'anion. Cependant, plusieurs modes d'association interviennent certainement comme nous le montrerons plus loin par analyse thermique différentielle. D'ailleurs, avec l'introduction d'une quantité de métal plus grande que précédemment, nous observons une teneur en fer lié beaucoup plus élevée : celle-ci ne peut s'expliquer uniquement par la formation de sels complexes, pas plus d'ailleurs que par l'intervention du fer ferreux résultant du pouvoir réducteur de l'humus. Il faut envisager qu'il se produit aussi une floculation mutuelle de deux colloïdes : l'hydroxyde de fer colloïdal doit s'associer aux complexes fer-humus électronégatifs, l'ensemble floculant quand l'équilibre des charges est atteint. Cette interprétation s'appuie notamment sur les travaux de MUIR, LOGAN et BOWN (1964) qui ont étudié les phénomènes de dispersion et de floculation de l'hydroxyde ferrique en présence d'acides organiques (acide citrique notamment).

TABLEAU 2

*Variations de la quantité de fer lié en fonction du pH lorsque le rapport initial fer/carbone est élevé*

| Fer lié | pH | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| En méq./100 mg de carbone.. | 2,82 | 7,38 | 5,80 | 5,57 | 6,70 | 7,63 | 7,48 | 7,16 |
| En méq./100 g acides humiques ..... | 1 289 | 3 376 | 2 652 | 2 547 | 3 062 | 3 489 | 3 420 | 3 275 |

Le minimum de fixation à pH 5 que nous avons mis en évidence dans le cas d'un grand apport de fer (fig. 1 *b*) pourrait traduire lui aussi l'existence de deux modes de liaison différents du métal avec les acides humiques.

Ce qui est certain c'est que le spectre d'absorption infrarouge des complexes fer-acides humiques floculés préparés entre pH 5 et 8 met en évidence la présence de bandes assez fortes et larges vers 3 200 $cm^{-1}$, qui traduisent l'existence de groupements OH liés (fig. 4). Cela peut montrer la présence, à côté de complexes hydroxylés, de liaisons hydrogène entre l'hydroxyde ferrique colloïdal et la matière organique.

L'abaissement du taux de fer lié observé au-dessus de pH 7 peut traduire la diminution progressive des « sels complexes hétéropolaires ». Selon KONONOVA (1967), il s'agirait d'une destruction qui serait complète à pH 10-11. Nous avons vérifié, notamment par électrophorèse comme nous le verrons plus loin, que l'élévation du pH a bien pour effet de *détruire* de tels complexes. La soude N/10 à pH 12, qui permet de séparer le « fer lié à la matière organique » de l'excès d'hydroxyde, ne disperse pas le complexe antérieurement floculé sans le modifier mais disperse seulement une association des deux colloïdes de signe contraire qui résultent de la destruction de celui-ci.

Beaucoup d'auteurs signalent que le calcium provoque la floculation des complexes de fer. Nous verrons par analyse thermique différentielle qu'il en résulte une modification de leur nature. Dans le même ordre d'idées, nous avons cherché quelle influence le calcium exerce sur le complexe humo-ferrique floculé. Nous nous sommes placés aux valeurs de pH 3, 5 et 7 qui correspondent aux maximums de la courbe de fixation en présence d'une grande quantité de fer (fig. 1 *b*) et nous avons ajouté 2, 20 et 50 p.p.m. de calcium. Nous avons constaté que cet apport de calcium n'a qu'une faible influence sur la quantité de fer lié et, par conséquent, ne décomplexe pas sensiblement le fer des produits floculés. ALEKSANDROVA (1960) signale d'ailleurs que les composés fer-humus sont à l'état de sels de calcium dans les chernozems.

Nous avons cependant constaté qu'à pH bas (inférieur ou égal à 5), le calcium peut déplacer une petite quantité de fer ferreux cationique qui passe en solution où la réaction à l'$\alpha\alpha'$-dipyridyle permet de le mettre en évidence.

2. *Conditions de mobilisation du fer par un acide humique en milieu neutre ou alcalin.*

Au cours des expériences précédentes, nous avons remarqué que le fer passe en pseudo-solution à des pH très faiblement acides ou basiques en présence d'ions alcalins. Dans certains cas (sols sodiques), l'existence de telles formes solubles serait donc susceptible de permettre des migrations du fer dans le sol. Les sols du Marais Poitevin d'où proviennent les acides humiques étudiés ont précisément un pH compris entre 7 et 8. Dans la même région, certains sols sur argile marine sont sodiques mais le calcium y est aussi toujours abondant (SALIN, 1969). Or, on considère généralement que le calcium insolubilise les acides humiques. Nous avons donc essayé de préciser les conditions de mobilisation du fer par les composés humiques dans un tel milieu. Les expériences qui suivent ont été réalisées sur les acides humiques de la tourbe $MZ_3$ et de l'anmoor LG.

a) *Influence de la variation du pH à volume constant pour un même apport de fer et de matière organique.*

Les conditions expérimentales sont les mêmes que plus haut mais l'apport de fer reste constant (3 100 méq. pour 100 g d'acides humiques correspondant à 39,84 g de carbone pour $MZ_3$ et 45,70 g pour LG). Aux pH envisagés, nous avons toujours obtenu une pseudo-solution et un précipité que nous avons dispersé dans de la soude N/10. Nous avons dosé le fer et le carbone dans la pseudo-solution et dans la fraction dispersable du précipité. Les résultats permettent d'établir un certain nombre de rapports (tabl. 3).

Quand le pH (ou la concentration en sodium qui lui est liée) augmente, le complexe passe progressivement sous une forme pseudo-soluble qui devient de plus en plus riche en fer. Le floculat diminue parallèlement mais dans la fraction dispersable, le rapport fer/carbone reste constant pour un humus donné.

Tout semble se passer comme si l'élévation du pH favorisait la dispersion d'un complexe riche en ions hydroxylés du fer qui viendrait s'ajouter dans la phase liquide à un autre complexe moins riche en fer. Cette conception paraît conforme au schéma de SCHNITZER et SKINNER (1964). Le maximum de fixation possible correspondrait au rapport Fe/C, sensiblement constant, de la fraction dispersable.

De toute manière, la quantité globale du fer lié ne varie pas et reste ici égale à l'apport initial.

TABLEAU 3

*Influence du pH sur la solubilité de l'association fer-acides humiques*

| Échantillons | pH | Taux de sodium introduit (méq./60 ml) | $\frac{\text{Fe méq.}}{\text{C mg}} \times 100$ | | $\frac{\text{Fe pseudo-soluble}}{\text{Fe lié}} \times 100$ | $\frac{\text{C pseudo-soluble}}{\text{C total}} \times 100$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fraction pseudo-soluble | Fraction dispersable | | |
| Anmoor LG | 7 | 1,78 | 4,1 | 7,6 | 17,7 | 28,8 |
| | 8 | 1,90 | 5,1 | 7,6 | 70,8 | 78,2 |
| | 9 | 2,06 | 6,2 | 7,7 | 94,4 | 95,4 |
| Tourbe $MZ_3$ | 7,5 | 1,84 | 5,2 | 9,2 | 37,7 | 51,6 |
| | 8,0 | 1,90 | 5,5 | 9,1 | 53,4 | 65,4 |

TABLEAU 4

*Influence de l'apport de fer sur son taux de dispersion*

| Échantillons | pH | Taux de fer initial (méq./100 g d'humus) | Taux de sodium introduit (méq./60 ml) | $\frac{\text{Fe méq.}}{\text{C mg}} \times 100$ | | Fe lié (méq./100 g de C) | $\frac{\text{Fe pseudo-soluble}}{\text{Fe lié}} \times 100$ | $\frac{\text{C pseudo-soluble}}{\text{C total}} \times 100$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Fraction pseudo-soluble | Fraction dispersable | | | |
| Anmoor LG | 7 | 3 100 | 1,78 | 4,0 | 7,6 | 6 600 | 17,7 | 28,8 |
| | | 3 800 | 2,06 | 1,9 | 7,8 | 7 200 | 2,5 | 9,4 |
| | | 5 700 | 3,01 | — | 7,6 | 7 650 | — | — |
| Tourbe $MZ_3$ | 7 | 1 900 | 1,18 | 4,1 | 5,7 | 4 450 | 76,9 | 82,1 |
| | | 3 100 | 1,79 | 3,2 | 9,1 | 7 300 | 14,3 | 31,7 |
| | | 3 800 | 2,06 | 2,4 | 9,0 | 8 000 | 3,7 | 15,0 |
| | 8 | 1 900 | 1,25 | 4,3 | 6,1 | 4 550 | 86,8 | 90,0 |
| | | 3 800 | 2,24 | 4,7 | 9,0 | 7 100 | 30,7 | 45,6 |

b) *Influence de l'apport de fer à pH et volume constants.*

Nous avons fait varier l'apport de fer en maintenant fixes toutes les autres conditions et notamment la quantité de matière organique. La quantité de soude introduite pour maintenir la valeur du pH varie parallèlement au taux de fer.

Le tableau 4 comporte les teneurs en fer et carbone organique des différentes fractions.

Contrairement à l'élévation du pH, l'augmentation du rapport Fe introduit/C total provoque l'apparition d'une forme floculée d'association humo-ferrique. Parallèlement, la quantité de fer lié augmente tandis que diminue la proportion de complexe dispersé.

Pour un apport de fer suffisant, le rapport Fe/C dans la fraction dispersable devient constant et caractéristique de l'acide humique. Pour une plus faible quantité (par exemple, 1 900 méq. de fer pour 100 g d'acides humiques) on obtient un floculat peu abondant et entièrement dispersable dans lequel le rapport Fe/C est plus faible. La saturation n'est alors pas atteinte dans le floculat.

c) *Influence des variations de concentration.*

Dans une autre série d'expériences, nous avons fait varier soit le volume de la solution, soit sa concentration en sodium introduit sous forme de chlorure, les autres conditions demeurant inchangées, notamment les quantités de fer et d'acide humique (tabl. 5).

TABLEAU 5

*Influence de la variation du volume et de la concentration en soude à pH 7 en présence de 3 800 méq. de fer pour 100 g d'humus*

| Échantillons | Volume de la solution (ml) | Taux de sodium introduit (méq.) | $\frac{\text{Fe méq.}}{\text{C mg}} \times 100$ | | Fe lié (méq./100 g de C) | $\frac{\text{Fe pseudo-soluble}}{\text{Fe lié}} \times 100$ | $\frac{\text{C pseudo-soluble}}{\text{C total}} \times 100$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fraction pseudo-soluble | Fraction dispersable | | | |
| Anmoor LG | 60 | 2,06 | 1,9 | 7,8 | 7 200 | 2,5 | 9,4 |
| | 120 | 2,06 | 2,7 | 8,0 | 7 000 | 7,1 | 18,6 |
| | 120 | 4,12 | 4,4 | 8,0 | 7 100 | 15,1 | 24,4 |
| Tourbe $MZ_3$ | 60 | 2,06 | 2,5 | 9,0 | 8 000 | 3,7 | 15,0 |
| | 120 | 2,06 | 2,7 | 9,4 | 8 100 | 7,8 | 19,0 |
| | 120 | 2,06 | 4,0 | 9,7 | 7 900 | 19,2 | 32,1 |
| | 180 | 6,18 | 4,1 | 10,1 | 7 750 | 26,4 | 39,5 |

Quand le fer agit sur un acide humique en solution diluée, il se forme d'autant plus de complexe soluble que la dilution est plus grande et le rapport Fe/C de la fraction dispersée augmente avec la dilution.

Pour ALEKSANDROVA (1967), le passage du complexe à l'état pseudo-soluble est lié à la fixation d'ions sodium. Nos essais effectués à pH constant montrent qu'une augmentation de la concentration en sodium favorise la dispersion du complexe.

d) *Influence du calcium.*

Nous avons vu précédemment que le calcium n'a pas d'influence notable sur la quantité de fer lié en présence d'un excès de fer. Nous avons aussi cherché à déterminer dans quelle mesure le calcium agit sur la solubilité du complexe.

Selon WRIGHT et SCHNITZER (1963), un apport infime de calcium (0,13 p.p.m.) suffit à précipiter un complexe dispersé de fer et d'acide fulvique. DEB (1949) avait cependant obtenu des résultats très différents selon le pH et le mode opératoire.

A partir des acides humiques de l'anmoor AM et de la tourbe $MZ_3$, nous avons préparé des solutions à pH 7 contenant 600 méq. de fer pour 100 g d'acides humiques (concentration en fer 40 p.p.m.). C'est approximativement le maximum de fer que les acides humiques peuvent maintenir en phase liquide dans ces conditions.

Nous avons ajouté des quantités variables de chlorure de calcium en maintenant le pH constant. Il faut alors une concentration de 50 à 60 p.p.m. de calcium pour que le complexe commence à floculer. Pour une concentration de 100 p.p.m., la floculation est presque totale. Nous verrons plus loin par analyse thermique différentielle que ces complexes dispersés et floculés n'ont pas la même stabilité thermique.

3. *Constitution des fractions pseudo-solubles et dispersables.*

a) *Fraction dispersable.*

La figure 2, obtenue en regroupant toutes les valeurs trouvées dans les essais précédents à pH égal ou supérieur à 7 (tabl. 3, 4 et 5), montre qu'il existe une corrélation entre la richesse en fer du complexe et la solubilité du carbone. Le complexe s'enrichit d'abord rapidement en fer, puis le rapport Fe/C en poids tend vers une limite voisine de 1/1. Le diagramme nous semble mettre en évidence l'existence de deux complexes différents entre le fer et l'acide humique. Ces deux complexes se différencient par leur teneur en fer.

Nous verrons plus loin, par ATD, qu'il existe bien deux types de structure dans les fractions solubles obtenues à pH élevé.

b) *Fraction dispersable.*

Dans cette fraction, le rapport entre le fer et le carbone est sensiblement constant et caractéristique de l'humus utilisé. Ainsi, les acides humiques de l'anmoor LG protègent à l'état dispersé 7 600-7 700 méq. de fer pour 100 g d'humus. Ceux de la tourbe $MZ_3$ en protègent 9 000-9 300. Les acides humiques de la tourbe sont donc, de ce point de vue, plus efficaces que ceux de l'anmoor. Il ne saurait s'agir d'un effet lié seulement à la capacité d'échange des acides humiques : celle-ci est toujours beaucoup plus faible même quand on considère ses valeurs déterminées à pH élevé (800 méq./100 g d'acide humique pour l'anmoor LG et 736 méq./100 g d'acide humique pour la tourbe $MZ_3$).

L'obtention d'un rapport Fe/C constant tend à indiquer que nous sommes en présence d'une structure assez bien définie faisant appel à autre chose qu'une simple adsorption.

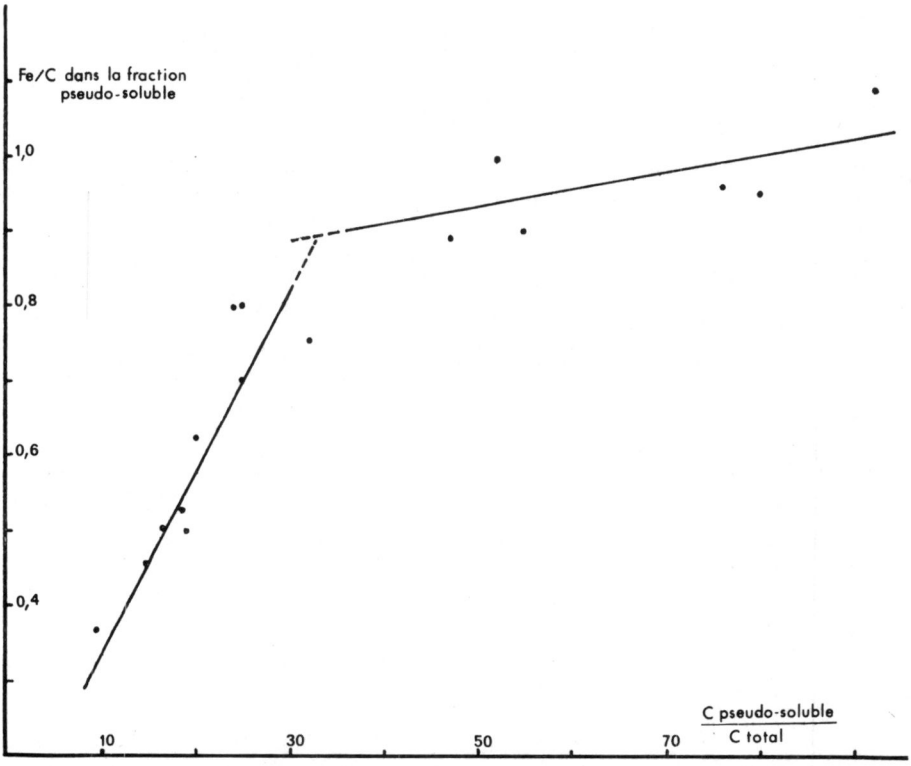



FIG. 2. — *Variations du rapport Fe/C (exprimé en poids) dans la fraction pseudo-soluble en fonction du taux de dispersion des acides humiques à pH ⩾ 7*

## III. — ASPECT QUALITATIF DE LA FIXATION DU FER SUR UN ACIDE HUMIQUE

Dans tous les cas, la mobilité de la matière organique chargée de fer est fortement réduite par rapport à celle des humates de sodium purs. Nous sommes en accord sur ce point avec plusieurs auteurs (D'YAKONOVA, 1962 ; JUSTE et DELAS, 1967).

Nous avons par ailleurs étudié le comportement du complexe quand le pH s'élève. Nous avons préparé des solutions en présence de 1 500 méq. de $Fe^{III}$ pour 100 g d'acides humiques. Nous avons effectué l'électrophorèse, en utilisant un tampon borate de sodium-soude dont le pH était ajusté à la même valeur que celui de la pseudo-solution du complexe.

A pH 9, le fer et la matière organique migrent ensemble vers l'anode. A pH 10, il existe deux formes anioniques de la matière organique : l'une est peu mobile et

contient du fer, l'autre est très mobile et ne contient plus de fer. A pH 11, la matière organique migre seule. Dans tous les cas, du fer non lié reste à la dépose sous forme d'hydroxyde.

Au total, l'étude par électrophorèse confirme l'existence, jusqu'à pH 10, de fer (ferreux ou ferrique selon les conditions de milieu) lié à la matière organique et engagé dans un anion complexe.

D'autre part, le passage du courant détruit l'association dispersée du complexe humo-ferrique anionique avec l'hydroxyde ferrique colloïdal qui flocule et reste seul à la dépose.

Le fer cationique observé dans les préparations faites à pH acide peut représenter un excès de métal demeuré libre en solution. Il peut s'agir aussi de fer ferreux lié à la matière organique sous forme échangeable (et notamment de fer déplacé par le calcium dans une expérience rapportée plus haut).

Pour distinguer les différents composés humo-ferriques et préciser dans une certaine mesure leurs propriétés qualitatives, nous avons employé deux techniques d'étude : l'électrophorèse et l'analyse thermique différentielle.

### A. — *Migration à l'électrophorèse du fer complexé*

A partir des acides humiques de l'anmoor LG, nous avons préparé des humates de fer pseudo-solubles à pH 3, 5 et 7 avec une quantité de chlorure ferrique suffisante pour obtenir un complexe en solution saturée (début de précipitation).

Nous avons soumis à l'électrophorèse sur papier le complexe ainsi préparé. Nous avons utilisé pour cela une cuve Polyphor Frentz et des bandes de papier Arches 302 imprégnées de solutions tampons dont le pH correspond à celui des préparations (tampons de Michaelis : acide acétique-acétate de sodium). Nous avons appliqué une tension de 7 volts/cm pendant 3 heures. Sur les électrophorégrammes, nous avons localisé le fer ferreux par l'$\alpha\alpha'$-dipyridyle et le fer ferrique par le ferrocyanure de potassium.

A pH 3, le complexe pseudo-soluble formé contient du fer ferreux et du fer ferrique liés à la matière organique qui migrent à l'anode. Par ailleurs, du fer ionique se déplace vers la cathode.

Aux pH 5 et 7, une partie du fer migre sous forme anionique ferrique, mais une certaine fraction reste immobile à la dépose sous forme d'hydroxyde.

### B. — *Étude par analyse thermique différentielle des formes de liaison entre le fer et les composés humiques*

Nous avons montré dans un travail antérieur (T. DUPUIS, JAMBU et J. DUPUIS, 1970 *a*) que l'on peut caractériser par ATD sous courant d'oxygène divers complexes ou sels métalliques formés avec les acides humiques et fulviques (Na, K, Ca, Mg, Fe). Notamment, l'emplacement des pics exothermiques d'oxydation au-dessus de 200°C varie avec la nature du métal associé.

D'autre part, nous avons pu mettre en évidence diverses formes de liaison entre le fer et les acides fulviques (T. DUPUIS, JAMBU et J. DUPUIS, 1970 *b*).

Afin de comparer les résultats obtenus avec les acides fulviques et humiques mis en présence de fer dans diverses conditions, nous rappellerons brièvement les principales conclusions de cette précédente étude.

En présence de quantités modérées de fer ferreux (moins de 800 méq./100 g d'acides fulviques), il apparaît, entre pH 2 et pH 5, un complexe pseudo-soluble.

La courbe d'ATD de la poudre provenant de la solution évaporée montre un pic intense qui débute vers 350°C et culmine à 380°C. Si le fer est introduit à l'état ferrique, ce complexe peut se former entre pH 2 et pH 5 par suite de l'action réductrice des acides fulviques. De pH 5 à pH 8, il apparaît un complexe pseudo-soluble thermiquement plus stable que le complexe ferreux. La courbe d'ATD de la poudre obtenue après évaporation montre un pic intense qui débute vers 400°C et culmine à 480°C.

Si la quantité de fer introduite est supérieure à 800 méq./100 g d'acides fulviques, les complexes floculent plus ou moins vite selon la teneur en fer. Après séchage à l'air, les précipités formés entre pH 2 et pH 5, présentent sur leur courbe d'ATD un pic moyen qui débute vers 220°C et culmine à 270°C, suivi d'un pic intense culminant à 380°C. Ils contiennent le fer sous ses deux valences.

Les courbes d'ATD des floculats formés entre pH 4 et pH 8 montrent surtout un pic intense culminant à 270°C.

Nous retrouvons des résultats assez analogues avec les acides humiques, bien qu'ils aient un pouvoir réducteur beaucoup plus faible.

Pour les fractions floculées, nous avons opéré sur la poudre séchée à l'air et diluée dans dix fois son poids d'alumine. Par ailleurs, les pseudo-solutions sont évaporées à 30°C et la poudre formée est diluée dans cinq fois son poids d'alumine. L'appareil utilisé est un microanalyseur thermique différentiel BDL, type M 1. Nous avons chauffé les mélanges avec l'alumine sous balayage d'oxygène de 90 ml/mn à la vitesse de chauffe d'environ 500°C à l'heure.

1. *Étude des formes pseudo-solubles.*

Si, *aux environs de pH 3*, on met en contact de l'acide humique et du fer ferreux (en quantité au plus égale à 300 méq./100 g d'acides humiques) introduit sous forme de sulfate, il se forme un complexe pseudo-soluble. Ce complexe ferreux humique est beaucoup plus sensible à l'oxydation que son homologue fulvique et nous n'avons pu l'obtenir pratiquement sous forme de poudre que par dessiccation à froid. Il se caractérise sur la courbe d'ATD par un pic exothermique très intense qui culmine à 380°C.

Nous n'avons jamais pu l'isoler en partant de chlorure ferreux, ni, à plus forte raison, de chlorure ferrique. Dans ce dernier cas, le pouvoir réducteur de l'acide humique est bien effectif au-dessous de pH 3 (comme on le vérifie facilement par la réaction à l'$\alpha\alpha'$-dipyridyle), mais le fer se réoxyde pendant le séchage.

Si, toujours aux environs de pH 3, on introduit des quantités plus grandes de fer ferreux (500 méq./100 g d'acides humiques) à l'état de sulfate, il se forme encore un complexe pseudo-soluble. Mais, après un contact prolongé à l'air, un floculat apparaît qui contient le fer sous ses deux valences. La courbe d'ATD (fig. 3 *a*) présente deux pics exothermiques moyens culminant à 280°C et 335°C, suivis d'un pic exothermique intense maximum à 380°C. Tout se passe ici comme si le complexe humique ferreux pseudo-soluble avait été entraîné par un complexe humique ferrique peu soluble que nous étudierons plus loin.

*Entre pH 4 et pH 8*, si l'on introduit de 300 à 800 méq. de fer ferrique (sous forme de sulfate ou de chlorure) pour 100 g d'acides humiques, il se produit une pseudo-solution où le fer est complexé comme le montre la lenteur avec laquelle la réaction au ferrocyanure de potassium le révèle. La poudre provenant de la dessiccation de la pseudo-solution complexe possède une grande stabilité thermique : sa courbe d'analyse thermique différentielle montre un pic exothermique intense qui débute

vers 400°C et culmine vers 480°C (fig. 3 *b*), c'est-à-dire à une température supérieure à celle de l'acide humique dessaturé (fig. 3 *c*) où le pic principal d'oxydation culmine à 430°C.

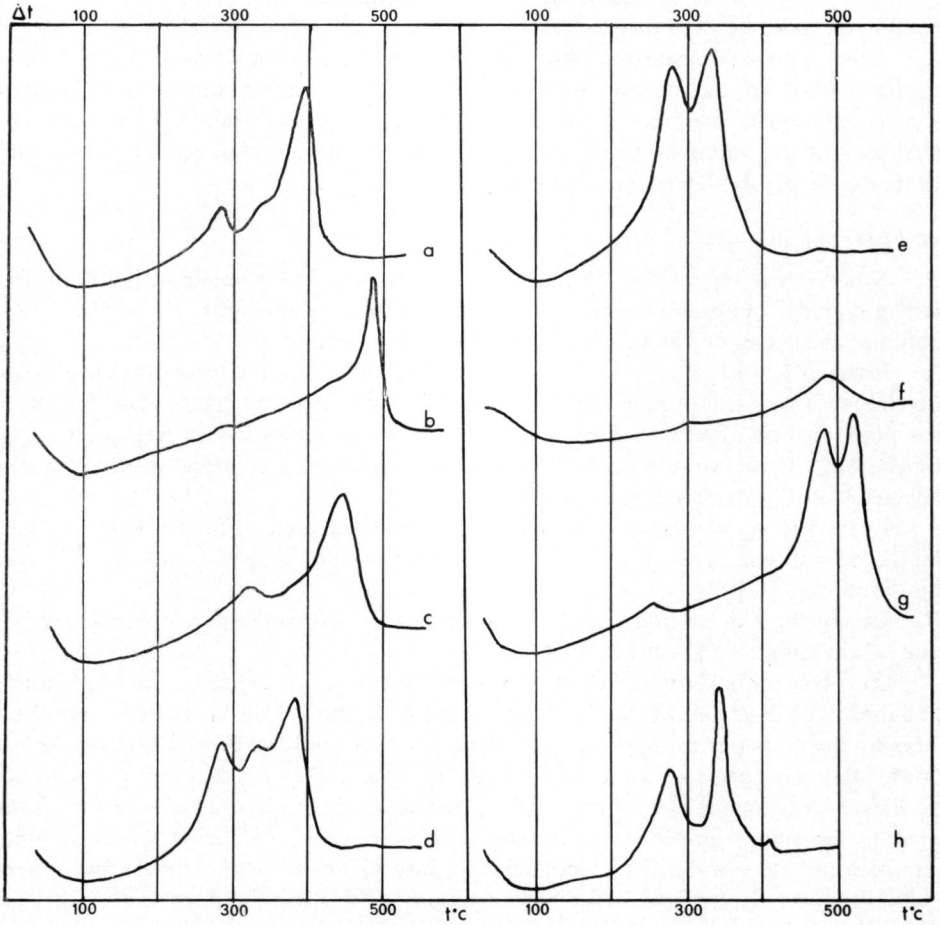



FIG. 3. — *Courbes d'analyse thermique différentielle des acides humiques de l'anmoor LG*

*a* : complexe ferreux dispersé
*b* : complexe ferrique dispersé
*c* : acides humiques dessaturés
*d* : floculat obtenu à pH 3
*e* : floculat obtenu à pH 7
*f* : sol d'hydroxyde de fer

*composés obtenus en présence de fer et de calcium*

*g* : dispersés
*h* : floculés

Nous avons vu plus haut que le rapport Fe/C de la pseudo-solution varie d'une façon discontinue à *pH relativement élevé* (pH $\geqslant$ 7) avec la dispersion de la matière organique, comme s'il existait deux types de complexes (fig. 2).

Pour un complexe pseudo-soluble à faible taux de fer (Fe/C en poids $<$ 0,8), fabriqué à pH 7, le pic exothermique de la courbe d'ATD se situe vers 480°C (fig. 3 *b*). Pour un complexe pseudo-soluble plus riche en fer, le pic d'oxydation de la courbe d'ATD culmine un peu plus bas, vers 450°C. On peut penser, conformément

aux vues de SCHNITZER et SKINNER (1964), que le complexe le moins riche comporte surtout la fixation d'ions $Fe(OH)^{++}$ alors que les ions $Fe(OH)_2^{+}$ domineraient dans l'association la plus riche. La présence de ces derniers rendrait le complexe thermiquement un peu moins stable. La présence des deux pics sur la même courbe d'ATD traduit un mélange des deux formes.

Avec une pseudo-solution obtenue à pH plus bas, on observe, en outre, sur la courbe d'ATD, un pic moyen culminant à 270°C. Nous verrons plus loin qu'il est dû à la floculation d'une fraction de la matière organique associée à de l'hydroxyde ferrique qui se produit au cours du séchage. Cette fraction est d'autant plus importante que le pH de départ est plus bas.

2. *Étude des floculats.*

Nous avons vu qu'en introduisant une quantité de fer supérieure à 800 méq. /100 g d'acides humiques, on provoque l'apparition d'un précipité : la courbe d'ATD obtenue avec celui-ci diffère selon le pH de la préparation.

Entre pH 2 et pH 3,5, la courbe correspondante (fig. 3 *d*) présente un pic exothermique assez fort, simple ou double, culminant à 280°C et 335°C. La séparation des deux pics est beaucoup plus marquée dans les anmoors LG et AM que dans la tourbe $MZ_3$. Le maximum observé plus haut correspond à la présence de complexe ferreux (380°C) entraîné lors de la floculation.

Entre pH 3,5 et pH 8, les floculats obtenus conduisent à un seul effet exothermique très intense vers 300°C, plus ou moins dédoublé selon l'échantillon d'acide humique (fig. 3 *e*).

La courbe *f* de la figure 3 est celle d'un sol d'hydroxyde ferrique préparé par dialyse du chlorure et séché à 30°C.

C'est très probablement l'existence de différents modes de liaison qui conditionne l'abaissement considérable de la température d'oxydation de la matière organique dans les floculats par rapport aux complexes pseudo-solubles. C'est ainsi que l'étude du floculat par spectrographie infrarouge (fig. 4) montre, à 3 200 $cm^{-1}$, l'existence de liaisons hydrogène assez fortes qui n'existent ni dans l'hydroxyde ferrique libre ni dans les acides humiques parfaitement déminéralisés, ni dans les sels sodiques ou calciques de ces derniers : ces liaisons interviennent donc vraisemblablement entre l'hydroxyde ferrique lié et l'acide humique. Il s'agirait, dans ces conditions, d'une liaison du fer beaucoup plus lâche que dans les complexes pseudo-solubles.

Au cours du chauffage, la déshydratation de l'hydroxyde ferrique doit provoquer la rupture de ces liaisons OH et entraîner à la suite la destruction de l'acide humique qui lui était lié : la pyrolyse de la matière organique est alors *totale* à 400°C. Il n'en est pas ainsi quand on part d'acides humiques parfaitement déminéralisés : dans les mêmes conditions de chauffe, la pyrolyse n'est pas totale à cette température.

Nos observations sont en bon accord avec celles de SCHNITZER et SKINNER (1964) qui travaillaient par thermogravimétrie, mais ne paraissent pas conformes aux résultats obtenus par JUSTE et DELAS (1969), qui ont utilisé un mode opératoire différent pour fabriquer les complexes.

ALEKSANDROVA *et al.* (1968) pensent que dans le complexe formé comme indiqué plus haut, la fraction organique associée à l'hydroxyde ferrique peut être soit de l'acide humique proprement dit, soit son sel de calcium, soit un complexe humique

plus pauvre en fer. L'ATD sous oxygène ne permet pas de trancher entre ces trois hypothèses. En effet, si la rupture des liaisons hydrogène à 270°C provoque la destruction de toute la matière organique présente, il n'est plus possible d'observer les pics de dissociation spécifiques signalés plus haut. Il semble cependant qu'il n'y ait pas de liaison hydrogène entre le complexe ferreux et l'hydroxyde ferrique

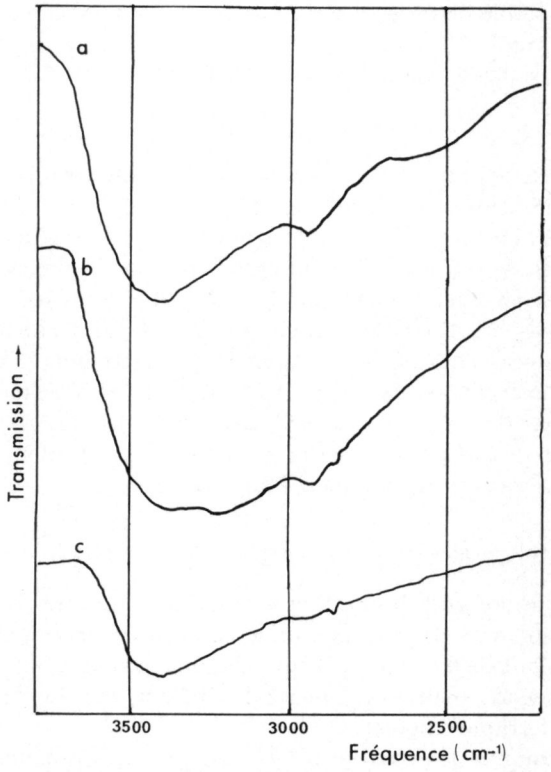



FIG. 4. — *Spectres d'absorption infrarouge entre 2 000 et 4 000 cm⁻¹ des acides humiques de l'anmoor LG*

*a* : acides humiques déminéralisés
*b* : acides humiques floculés à pH 7 en présence de 1 800 méq. de Fe/100g d'acides humiques
*c* : hydroxyde ferrique provenant de la dessication d'un sol formé à pH 5,5

colloïdal puisque le premier subsiste au-dessus de 270°C. Dans ces conditions, l'abaissement du point de décomposition ne peut être attribué à un effet catalytique du fer.

Nous avons vérifié que l'abaissement de la stabilité thermique d'un acide organique associé avec de l'hydroxyde ferrique après floculation d'un sol colloïdal est un phénomène général. Nous avons utilisé pour cela quelques acides organiques simples tels que l'acide citrique dont le comportement en milieu aqueux vis-à-vis du fer a été étudié en détail par MUIR *et al.* (1964).

Nous avons examiné à l'aide de leur courbe d'ATD la stabilité thermique de floculats formés entre le fer et l'acide citrique à différents pH. La présence d'hydroxyde ferrique abaisse la stabilité de la fraction organique :

| | *Température des pics de décomposition* |
|---|---|
| Acide citrique | 370°C |
| Floculat d'acide citrique par le fer (pH 3) | 300°C |
| Acide citrique amené à pH 7 par la soude | 340°C |
| Complexe pseudo-soluble de fer et d'acide citrique (amené à pH 7 par la soude) | 315°C-380°C |
| Floculat d'acide citrique par le fer (amené à pH 7 par la soude) | 255°C |

Il en est de même avec des acides organiques aussi différents que l'acide oxalique, l'acide phtalique et l'acide salicylique.

La courbe d'ATD du gel d'hydrate ferrique présente des pics exothermiques très variables (aussi bien quant à leur intensité que par la température à laquelle ils se manifestent) selon le mode de préparation (MACKENZIE, 1949 ; KULP et TRITES, 1951 ; GHEITH, 1952) : l'hydroxyde ferrique précipité à pH 7 par la soude dans des conditions analogues à celles où l'on obtient les floculats organo-ferriques étudiés, ne montre qu'un accident exothermique très faible et étalé vers 500°C. De toute manière, il n'y a pas de commune mesure, à quantité de substance égale, entre le pic de cristallisation de l'hématite et les pics exothermiques toujours très importants qui résultent de la pyrolyse des complexes organo-métalliques.

3. *Étude des complexes formés en présence de fer et de calcium.*

Il nous a paru intéressant de chercher à connaître la nature du ou des *complexes pseudo-solubles* formés vers pH 7 quand on associe du fer et du calcium à un acide humique jusqu'à début de floculation. Pour cela, nous avons ajouté soit du chlorure ferrique dans une pseudo-solution d'humate de calcium, soit du chlorure de calcium dans un complexe ferrique dispersé.

Nous avons examiné les courbes d'ATD des poudres obtenues après séchage de pseudo-solutions d'acides humiques contenant du fer et du calcium en diverses proportions. Les courbes d'ATD des poudres contenant avant leur séchage des concentrations à peu près égales (inférieures ou égales à 40 p.p.m.) de fer et de calcium sont semblables dans les deux cas. On y observe toujours le pic caractéristique du complexe pseudo-soluble formé entre le fer et l'acide humique à côté des accidents caractéristiques du composé apparu quand l'acide humique est mis en présence de calcium (fig. 3 *g*).

Rappelons à ce propos que la courbe d'ATD de l'humate de calcium provenant d'une pseudo-solution de ce sel, en présence de soude, évaporée à 30°C, montre un pic moyen culminant à 320°C, suivi d'un pic très intense dont le maximum est à 520°C (T. DUPUIS, JAMBU et J. DUPUIS, 1970 *a*).

Sur la courbe *g* de la figure 3, on relève, en particulier, les deux pics d'intensité forte, bien séparés et culminant à 480°C pour le fer et à 520°C pour le calcium. Ces pics sont précédés d'un accident exothermique plus faible culminant vers 280°C quand le pH de la solution s'abaisse en dessous de 7 et parfois aussi d'un second pic faible, maximum à 325°C.

Aucun pic nouveau n'apparaît qui puisse traduire l'existence d'une combinaison stable différente entre l'acide humique, le fer et le calcium.

Nous avons examiné, d'autre part, la nature du *floculat* qui se forme quand la concentration en calcium est suffisante (fig. 3 *h*).

Les courbes d'ATD sont comparables à celles obtenues avec le fer seul. Elles sont caractérisées par un double accident exothermique très intense, culminant à 280°C et 345°C. Le second pic est beaucoup plus important que le premier et se produit à une température plus élevée que dans le cas où le fer était seul introduit (330°C). Il correspond probablement à la rupture d'une forme de liaison entre de l'humate de calcium et de l'hydroxyde ferrique analogue à celle que nous avons rencontrée plus haut dans le cas du fer seul.

## IV. — CONCLUSION

L'action des acides humiques sur le fer joue certainement un rôle important dans la pédogenèse et, notamment, dans les processus de migration et d'accumulation de ce métal. Les acides organiques peuvent en effet s'associer une quantité notable de fer sous une forme pseudo-soluble (migratrice) ou floculée (immobile) selon les conditions de milieu. Le domaine de stabilité de la phase pseudo-soluble est cependant plus étendu pour les complexes fulvo-ferriques que pour les complexes humo-ferriques.

Aux basses valeurs de pH, les composés humiques réduisent le fer et peuvent en fixer une quantité importante.

En présence d'ions alcalins, la forme complexée du fer lié présente une solubilité qui augmente avec le pH et avec la dilution des solutions. Cependant, entre pH 9 et pH 11, le complexe se détruit progressivement et le fer libéré passe à l'état de « sol » instable qui finit par floculer sous forme d'hydroxyde. Par ailleurs, la solubilité du complexe diminue quand l'apport initial de fer augmente. Elle est également influencée par le calcium : il faut cependant une assez forte concentration en cet élément (50 à 60 p.p.m.) pour faire apparaître un début de floculation dans une pseudo-solution de complexe ferrique à pH 7.

Dans la forme floculée dispersable par la soude, la quantité de fer fixée à l'humus est constante et caractéristique de l'échantillon d'humus.

L'analyse thermique différentielle montre que les formes de liaison du fer sont multiples. En milieu acide, il apparaît un complexe ferreux soluble caractérisé par un pic exothermique culminant à 380°C. En présence de fer ferrique, il semble exister deux complexes solubles, caractérisés par un pic exothermique culminant à 480°C pour l'un et 450°C pour l'autre. Cette dernière forme est plus riche en fer et n'apparaît qu'à pH égal ou supérieur à 7.

A pH inférieur à 5, le complexe ferreux (pic à 380°C) et l'un des complexes ferriques (pic à 480°C) peuvent coexister.

La forme floculée donne un accident exothermique intense culminant à 280°C et 335°C.

Quand les acides humiques sont mis en présence de fer et de calcium dans des

conditions telles qu'une partie au moins en demeure dispersée, on observe, dans cette fraction, la coexistence du complexe ferrique (pic à 480°C) et de l'humate de calcium (pic à 520°C) pseudo-solubles.

Il semble que l'on puisse identifier directement plusieurs de ces produits dans les horizons humifères des sols.

*Reçu pour publicatio n en décembre 1971.*

## SUMMARY

### STUDY OF A FEW ASPECTS OF IRON FIXATION BY HUMIC ACIDS

Studying the conditions under which iron is fixed by the humic acids of hydromorphic and calcimorphic soils, we have noticed that, when these acids are mixed with a ferric chlorid solution, depending on the conditions, either colloïdal pseudo-soluble complexes dispersed in the liquid phase or a flocculate with a more or less high iron content are formed.

The « linked » iron corresponds to the whole of the iron associated to the organic matter either as flocculate or as dispersed hydrosol. The « dispersible » iron represents the fraction of the iron linked with the flocculated organic matter that soda brings to the liquid phase.

The amount of « linked » iron depends on the pH and the initial iron concentration. In a sodic, neutral or alkaline medium, the dispersion of the humo-ferric compounds increases with pH, dilution and sodium content, the complexe gradually flocculates as the initial brought iron increases.

The « linked » iron content is constant and characteristic of humus in the dispersible fraction. The DTA curves (differential thermal analysis in oxygen) allow to identifize one ferrous and two ferric complexes characterized by their temperature of pyrolysis by oxydation.

The exothermic peaks respectively culminate at about 380°C for the ferrous complexe and 450°C or 480°C for the both ferric complexes. The last ferric complex (exothermical peak at 480°C) has not such as high iron content as the other which is oxidized at about 450°C, this last one appearing at high pH ($\geqslant$ 7). Moreover, the DTA shows that, in the flocculated complex the whole of the organic matter linked with iron is destroyed at lower temperatures (280°C - 335°C). In a ferric complex dispersed at pH 7 an addition of 50 to 60 p.p.m. of calcium causes flocculation. The DTA curves show that the pseudo-solution contains ferric complex and calcium humate.

## ZUSAMMENFASSUNG

### UNTERSUCHUNG EINIGER ASPEKTE DER EISENBINDUNG DURCH HUMUSSAUREN

Die Bedingungen zur Bindung des Eisens durch Humussäuren in kalziumhaltigen hydromorphen Böden wurden untersucht. Werden diese Säuren mit einer Lösung von Ferrichlorid zusammengebracht, bilden sich, je nach den vorhandenen Bedingungen, kolloidale, pseudolösliche Komplexe, die in der äüssigen Phase dispergiert bleiden oder es entsteht mehr oder weniger eisenhaltige Ausflockung. Das « gebundene » Eisen entspricht der gesamten an die organische Substanz gebundenen Eisenmenge, sowohl im ausgeflockten Zustand wie auch als dispergiertes Hydrosol. Das « dispergierbare » Eisen stellt den Anteil des an die ausgeflockte organische Substanz gebundenen Eisens dar, der unter dem Einfluss des Natriumhydroxyds in die flüssige Phase übergeht. Die Menge des gebundenen Eisens ändert sich mit dem pH - Wert und der ursprün glichen Konzentration an Eisenionen. In natriumhaltiger Umgebung, neutral oder alkalisch, nimmt die Dispersion der Humo-Ferriverbindungen mit dem pH — Wert, der Verdünnung und dem Natriumgehalt zu.

Der Komplex flockt prlgressiv aus, sobald sich die ursprüngliche Eisenzufuhr erhöht. Im dispergierbaren Anteil ist der Gehalt an gebundenem Eisen konstant und für Humus spezifisch. Die Kurven einer thermischen Differentialanalyse unter Sauerstoff gestation die Identifizierung eines Ferro-Komplexes und zweier Ferri-Komplexe, die durch ihre Pyrolysetemperatur durch Oxydation gekennzeichnet werden. Diese erreicht ihre Maximalstärke gegen 380°C für den Ferro-

Komplex, beziehungsweise bei etwa 450°C und 480°C für die beiden Ferri-Komplexe. Der Ferri-Komplex, der durch ein exothermisches Maximum bei 480°C gekennzeichnet ist, ist ärmer an Eisen als derjenige, der sich bei etwa 450°C oxydiert. Letzterer bildet sich bei hohen pH - Werten ($\geqslant 7$). Andererseits zeigt die thermische Differentialanalyse, dass im ausgeflockten Komplex die Gesamtheit der an das Eisen gebundenen Substanz bei niedrigerer Temperatur zerstört wird (280°C - 335°C).

In einem bei pH 7 dispergierten Ferri-Komplex erzeugt die Zufuhr von 50 bis 60 p.p.m. Kalzium einen Anfang von Ausflockung. Die Analyse-Kurven zeigen die Anwesenheit in der Pseudo-Lösung von Ferri-Komplex und Kalziumhumat.

## РЕЗЮМЕ

Изучение некоторых аспектов фиксации железа гуминовыми кислотами.

П. ЖАМБЮ, ТЕРЕЗА ДЮПЮИ, Ж. ДЮПЮИ.

Условия фиксации железа гуминовыми кислотами изучались в гидроморфных известковых почвах. Когда эти кислоты приводились в соприкосновение с хлоридом железа, то, в зависимости от условий, образовывались коллоидальные псевдо-растворимые комплексы, рассеянные в жидкой фазе, или-же флокуляты, более или менее богатые железом. «Связанное» железо представляет совокупность металла соединенного с органическим веществом, как в форме флокулятов, так и в состоянии дисперсных гидрозолей. Железо способное к дисперсии является фракцией связанной со свернувшимся органическим веществом, которое под действием NaOH переодхит в жидкую фазу. Количество связанного железа меняется с изменением pH и зависит от исходной концентрации NaOH. В натриевой, нейтральной, или-же щелочной среде дисперсия железо-гуминовых соединений увеличивается с увеличением pH, разбавления и содержания натрия; комплекс прогрессивно флокулирует, по мере того, как увеличивается содержание железа. В дисперсной фракции содержание связанного железа остается постоянным и охарактеризовывает гумус.

Кривые теплового дифференциального анализа под кислородом позволяют отождествить один железистый и два железных комплекса, характеризующихся температурой их пиролиза окислением. Пиролиз достигает максимальной интенсивности при температуре около 380° для железистого комплекса, и около 450° и 480° для комплексов железных. Железный комплекс характеризующийся кульминационным экзотермическим пиком при 480° содержит меньше железа, чем комплекс окисляющийся при температуре около 450°. Этот последний образуется при высоких значениях pH. С другой стороны дифференциальный тепловой анализ показал что во флокулирующем комплексе все органическое вещество связанное с железом, разрушается при температурах более низких (280°-335°).

Введение 50-60 ppm кальция при pH = 7, вызывает флокуляцию в дисперсном железном комплексе. Кривые дифференциального теплового анализа указывают здесь на существование в псевдо-растворе железного комплекса — гумата кальция.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ALEKSANDROVA L. N., 1954. The nature and properties of the products of reaction of humic acids and humates with sesquioxides. *Pochvovedenie*, **1**, 14-19.

ALEKSANDROVA L. N., 1960. On the composition of humus substances and the nature of organo-mineral colloids in soil. *7th Int. Cong. of Soil Sci., Madison, Wisc. U. S. A.*, **2**, 11, 74-81.

ALEKSANDROVA L. N., 1967. Organo-mineral humic acid derivatives and methods of studying them. *Soviet Soil Sci.*, **7**, 903-913.

ALEKSANDROVA L. N., ARSHAVSKAY T. T., DORFMAN E. M., LYUZIN M. F., YURLOVA O. V., 1968. Humus acids and their organo-mineral derivatives in soil. *9th Int. Cong. of Soil Sci., Adelaide, Australia*, **3**, 143-152.

DEB B. C., 1949. The movement and precipitation of iron oxides in podzol soils. *J. Soil Sci.*, **1**, 1, 112-122.

DEMOLON A., BASTISSE E. M., 1938. Sur quelques complexes colloïdaux du fer et de l'aluminium. *Ann. agron.*, **8**, 6-33.

DUPUIS T., JAMBU P., DUPUIS J., 1970 *a*. Étude par analyse thermique différentielle des substances organiques extraites de sols hydromorphes calciques. *Ann. agron.*, **21**, 1, 75-94.

DUPUIS T., JAMBU P., DUPUIS J., 1970 *b*. Sur les formes de liaisons entre le fer et les acides fulviques de sols hydromorphes. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **270**, 2264-2267.

D'YAKONOVA K. V., 1962. Iron-humic complexes and their role in plant nutrition. *Soviet Soil Sci.*, **7**, 692-698.

GHEITH M. A., 1952. Differential thermal analysis of certain iron oxides and oxide hydrates. *Amer. J. Sci.*, **250**, 177-195.

JAMBU P., 1968. Observations sur l'humification en milieu calcique hydromorphe. *Sci. Sol*, **1**, 67-89.

JUSTE C., DELAS J., 1967. Influence de l'addition d'aluminium, de fer, de calcium, de magnésium ou de cuivre sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique. *Ann. agron.*, **18**, 4, 403-427.

JUSTE C., DELAS J., 1969. Influence du degré de salification d'un composé humique sur son comportement thermique. *Ann. agron.*, **20** (2), 145-159.

KAWAGUCHI K., KYUMA K., 1959. On the complex formation between soil humus and polyvalent cations. *Soi and Plant Food*, **5**, 2, 54-63.

KONONOVA M. M., 1961. *Soil organic matter*. Pergamon Press, Oxford, 1 vol., 450 p.

KONONOVA M. M., 1967. Methods of determining humus composition and their rationalization. *Soviet Soil Sci.*, **7**, 894-903.

KOVALEV V. A., GENERALOVA V. A., 1967. Interaction of humic and fulvic acids with iron in peat soils. *Soviet Soil Sci.*, **9**, 1261-1268.

KULP J. L., TRITES A. F., 1951. Differential thermal analysis of natural hydrous ferric oxides. *Amer. Miner.*, **36**, 23-44.

LEVASHKEVICH G. A., 1966. Interaction of humic acids with iron and aluminum hydroxides. *Soviet Soil Sci.*, **4**, 422-427.

MACKENZIE R. C., 1949. Nature of free iron oxides in soils clays. *Nature*, **164**, 6, 244.

MUIR J. W., LOGAN J., BOWN C. J., 1964. The mobilization of iron by aqueous extracts of plants. II. Capacities of the amino-acid and organic-acid fractions of a pine-needle extract to maintain iron in solution. *J. Soil Sci.*, **15**, 2, 226-237.

SALIN R., 1969. *Contribution à l'étude de l'économie de l'eau dans les sols du Marais Poitevin* (*Marais Mouillé*). Thèse 3e cycle, Poitiers, 151 p.

SCHNITZER M., SKINNER S. I., 1964. Organo-metallic interactions in soils. 3. Properties of iron- and aluminum-organic matter complexes, prepared in the laboratory and extracted from a soil. *Soil Sci.*, **98**, 3, 197-203.

WRIGHT J. R., SCHNITZER M., 1963. Metallo-organic interactions associated with podzolization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 2, 171-176.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (3), 355-367.

# MOBILISATION DU K DES SOLS PAR LE NaTPB EN RELATION AVEC LE COMPORTEMENT DES CULTURES

B. CABIBEL

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,*
*84 - Montfavet*

RÉSUMÉ

La libération du potassium par les sols a été étudiée au moyen du réactif NaCl-NaTPB. L'étude a porté sur 34 échantillons de sols différents quant à leur origine ou à l'entretien de leur niveau potassique, mais appartenant tous à des dispositifs expérimentaux de longue durée, dont la réponse aux apports de potasse est connue.

Pour les échantillons de sols étudiés, la comparaison des quantités de K extraites en présence de NaCl-NaTPB pour les divers temps de contact utilisés et des résultats culturaux fait apparaître la concordance entre les quantités de K extraites à 1 heure et la réponse des cultures au champ vis-à-vis des apports de potasse.

## I. — INTRODUCTION

La nutrition potassique des végétaux est sous la dépendance des possibilités de mobilisation du potassium des sols et du développement du système racinaire de la plante. Le prélèvement du K se fait sous sa forme définie comme échangeable, mais en cas d'exportation importante, on est obligé d'admettre l'intervention des autres formes du K du sol. La richesse en K disponible du sol dépendra alors des possibilités de libération des diverses formes de K mobilisables et non du seul K échangeable. Il arrive en effet que des sols faiblement pourvus en K échangeable ne répondent pas aux apports de potasse, tandis que des sols mieux pourvus réagissent.

Nous remercions les Stations d'Agronomie d'Amiens et de Dijon (I. N. R. A.), l'Institut de Recherches d'Agronomie tropicale, la Société Commerciale des Potasses et de l'Azote (S. C. P. A.), la Compagnie d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc (C. N. A. B. R. L.), le Syndicat des Riziculteurs d'Arles, qui nous ont fourni les échantillons de sols de leurs dispositifs expérimentaux.

Divers auteurs, (DUTHION, 1966 ; BLANCHET *et al.*, 1967 ; SMITH *et al.*, 1968 ; DUTHION, 1970), ont montré qu'une fraction importante du K total des sols est susceptible d'échange à condition de maintenir dans la solution d'extraction un niveau très bas en potassium soluble, condition réalisée par adjonction de tétraphénylborate de sodium à la solution d'extraction (SCOTT *et al.*, 1960), le NaTPB précipitant le K extrait sous forme de KTPB insoluble (GEILMAN et GEBAUER, 1953). Il existe alors une relation linéaire entre les quantités de K ainsi extraites du sol par le NaTPB et le logarithme du temps de contact sol-solution d'extraction (DUTHION, 1966 ; SMITH *et al.*, 1968 ; DUTHION, 1970). Par analogie au mécanisme mis en évidence dans la libération du K des minéraux micacés, le mécanisme contrôlant la libération du K serait essentiellement une diffusion simultanée des ions K et Na dans les espaces interfeuillets (DUTHION, 1971). Nous-même avons montré dans une étude antérieure, le rôle joué dans cette libération de K par les fractions les plus fines du sol (CABIBEL, 1971).

Dans la présente étude, la méthode d'extraction au NaTPB a été appliquée à des échantillons de sols dont la réponse aux engrais potassiques est connue. L'objectif poursuivi est :

— de mettre en évidence l'importance des réserves K ainsi mobilisables ;
— d'examiner s'il peut exister une relation entre les divers paramètres de l'étude au NaTPB et la réponse des cultures au champ. Cette relation permettrait de choisir un critère NaTPB caractérisant les possibilités réelles de libération en K des sols étudiés.

## II. — MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 1. — *Sols étudiés*

Les sols étudiés d'origine géographique très différente, correspondent à des types pédologiques très variés. Ils proviennent tous de dispositifs expérimentaux de longue durée où est étudiée la fertilisation potassique de cultures très diverses. Pour chaque dispositif expérimental, les extractions du K au NaTPB ont été effectuées sur des échantillons provenant de la parcelle témoin et de la parcelle la plus fertilisée et prélevés dans l'horizon de surface couramment travaillé.

Les caractéristiques analytiques, physiques et chimiques, y compris les teneurs en K total et en K échangeable, sont rassemblées dans le tableau 1. Sur ce même tableau figurent la date de mise en place de l'essai, les doses annuelles de potasse apportées (unités $K_2O$/ha/an) sur la parcelle fertilisée et les résultats culturaux.

La réponse aux fumures potassiques indiquée dans ce tableau correspond pour chaque sol à une donnée moyenne déduite des résultats culturaux obtenus annuellement depuis la mise en place de l'essai et cela pour deux types de culture considérée, l'une, comme peu exportatrice de K (céréale) et l'autre, comme fortement exportatrice de K (prairie temporaire — betterave — pomme de terre).

### 2. — *Méthodes utilisées*

Les déterminations du K total, du K échangeable et du K NaTPB ont été faites selon les techniques analytiques suivantes :

1. K total : 0,1 g de sol préalablement calciné au four à 950°C, puis finement broyé et séché à l'air à 100°C pendant deux heures est attaqué par un mélange acide perchlorique- acide fluorhydrique. Après passage au bain de sable à 250°C, le résidu est repris par HCl 6 N. Après dissolution lente, on filtre et l'on ajuste à 100 ml par $H_2O$ permutée. On détermine la teneur en K du

TABLEAU I

*Caractéristiques des sols étudiés*

| | Origine des sols | Montfavet I. N. R. A. (Vaucluse) | Beauchamp (Bouches-du-Rhône) | Asport (Gard) | Omiécourt (Somme) | Allonville (Somme) | Monastère de la Pierre-qui-Vire (Yonne) | Romans (Ain) | Pont-St-Martin (Loire-Atlantique) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nature des sols | Alluvions de la Durance | Alluvions du Rhône | Brun de lehm | Loess | Loess | Sol sur arène granitique | Limons fins des Dombes | Alluvions anciennes |
| | Numéro d'identification | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Caractéristiques physiques et chimiques | Argile( %) | 25,0 | 32,0 | 18,5 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 8,0 | 5,0 |
| | Limon fin (%) | 34,0 | 53,0 | 19,5 | 27,5 | 26,5 | 14,0 | 31,0 | 18,5 |
| | Limon grossier (%) | 24,0 | 8,4 | 39,7 | 54,5 | 54,9 | 7,3 | 42,8 | 21,5 |
| | Sable fin (%) | 10,0 | 1,8 | 19,1 | 4,4 | 3,8 | 9,6 | 16,8 | 22,8 |
| | Sable grossier (%) | 3,0 | 0,6 | 5,2 | 0,5 | 0,6 | 53,5 | 2,2 | 32,0 |
| | Calcaire total (%) | 38,0 | 34,5 | — | 1,0 | 1,5 | — | — | — |
| | Calcaire actif (%) | 13,0 | 20,8 | — | — | — | — | — | — |
| | pH ($H_2O$) | — | — | 6,6 | 8,10 | 7,90 | 5,5 | 6,6 | 6,4 |
| | pH (KCl) | — | — | 6,4 | 7,40 | 7,20 | 5,1 | 6,4 | 6,2 |
| | Matières organiques (%) | 3,40 | 2,40 | 1,56 | 2,20 | 2,00 | 1,45 | 2,24 | 1,84 |
| | K échangeable en méq./100 g de sol : | | | | | | | | |
| | parcelle témoin | 0,26 | 0,48 | 0,30 | 0,18 | 0,28 | 0,12 | 0,10 | 0,07 |
| | parcelle enrichie | 0,27 | 0,49 | 0,37 | 0,32 | 0,59 | 0,20 | 0,23 | 0,21 |
| | K total en méq./100 g de sol (parcelle témoin) | 30,2 | 33,3 | 39,1 | 44,2 | 44,5 | 103,6 | 18,2 | 22,5 |
| Renseignements culturaux | Année de mise en place de l'essai | 1954 | 1962 | 1963 | 1957 | 1953 | 1958 | 1961 | 1962 |
| | Apport moyen annuel de $K_2O$ sur la parcelle enrichie (kg/ha) | 240 | 100 | 290 | 250 | 190 | 150 | 270 | 150 |
| | Type de culture | Riz | Riz | Maraîchage | Polyculture | Polyculture | Prairies temp. | Polyculture | Polyculture |
| | Réponse des cultures aux fumures potassiques — Cultures exigeantes en K | | | +++ | +++ | — | +++ | +++ | +++ |
| | Réponse des cultures aux fumures potassiques — Cult. moins exigeantes en K | — | — | — | — | — | | +++ | +++ |

+++ : réponse très forte. ++ : réponse moyenne. + : réponse faible. — : réponse nulle.

TABLEAU I (*suite*)

*Caractéristiques des sols étudiés*

| | Origine des sols | Ste-Marthe (Lot-et-Garonne) | Aixe-sur-Vienne (Hte-Vienne) | Ablis (Yvelines) | Le Rafidin (Marne) | Moirans (Isère) | Ozoir -le-Breuil (Eure-et-Loir) | Marbeuf (Eure) | Ambohi-mandroso (Madagascar) | Ampangabé (Madagascar) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nature des sols | Boulbène | Limon | Limon | Craie de Champagne | Alluvions de l'Isère | Limons de Beauce | Limon | Sol brun ferralitique sur basalte | Sol ferralitique sur gneiss |
| | Numéro d'identification | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Caractéristiques physiques et chimiques | Argile (%) | 9,0 | 18,0 | 15,5 | 27,5 | 21,0 | 22,5 | 5,0 | 37,5 | 34,5 |
| | Limon fin (%) | 25,5 | 24,0 | 26,0 | 28,5 | 39,5 | 30,5 | 28,5 | 38,6 | 12,5 |
| | Limon grossier (%) | 39,7 | 13,1 | 49,4 | 9,4 | 20,2 | 37,8 | 52,6 | 4,5 | 3,9 |
| | Sable fin (%) | 18,9 | 32,6 | 8,4 | 10,8 | 16,1 | 4,0 | 13,2 | 9,2 | 20,4 |
| | Sable grossier (%) | 7,1 | 11,4 | 1,0 | 19,7 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 6,9 | 31,2 |
| | Calcaire total (%) | — | — | — | 73,4 | 10,8 | — | traces | — | — |
| | Calcaire actif (%) | — | — | — | 25,0 | 5,0 | — | — | — | — |
| | pH ($H_2O$) | 6,3 | 6,2 | 6,7 | — | — | 7,5 | 7,5 | 4,4 | 4,9 |
| | pH (KCl) | 6,1 | 5,6 | 6,5 | — | — | 7,0 | 7,3 | 4,2 | 4,6 |
| | Mat. organ. (%) | 1,46 | 3,16 | 2,72 | 5,28 | 6,44 | 2,62 | 2,00 | 3,30 | 1,74 |
| | K échang. en méq./100 g de sol : | | | | | | | | | |
| | parcelle témoin | 0,11 | 0,12 | 0,20 | 0,42 | 0,08 | 0,23 | 0,24 | 0,08 | 0,04 |
| | parcelle enrichie | 0,19 | 0,17 | 0,47 | 0,70 | 0,09 | 0,62 | 0,27 | 0,11 | 0,08 |
| | K total en méq./100 g de sol : (parcelletémoin) | 28,9 | 33,3 | 30,7 | 7,4 | 42,2 | 34,0 | 32,2 | 1,5 | 1,0 |
| Renseignements culturaux | Année de mise en place de l'essai : | 1961 | 1960 | 1966 | 1966 | 1965 | 1964 | 1965 | 1964 | 1965 |
| | Apport moyen annuel de $K_2O$ sur la parcelle enrichie (kg/ha) | 160 | 160 | 240 | 300 | 240 | 150 | 200 | 150 | 150 |
| | Type de culture | Céréales | Polyculture | Polyculture | Polyculture | Céréales | Céréales | Polyculture | Maïs | Maïs |
| | Réponse des cultures — Cultures exigeantes en K | +++ | ++ | ++ | +++ | | | + | | |
| | Réponse des cultures — Cult. moins exigeantes en K | +++ | — | + | ++ | +++ | + | — | +++ | +++ |

+++ : réponse très forte. ++ : réponse moyenne. + : réponse faible. — : réponse nulle.

filtrat (JACKSON, 1958). Le contrôle des déterminations est obtenu par adjonction, à chaque série d'analyses, de standards dont la teneur en $K_2O$ total est connue.

2. K échangeable : 10 g de sol sont percolés en 4 heures par 200 ml d'une solution normale et neutre d'acétate d'ammonium.

3. K extractible au NaCl-NaTPB : on extrait le K par agitation continue de 1 g de sol en présence de 20 ml d'une solution 1,5 N NaCl contenant 1 méq. de NaTPB. Les agitations sol-solution d'extraction sont effectuées dans une enceinte thermostatée à 20°C. La durée de contact est variable. Pour tous les échantillons examinés, elle a été successivement de 1, 2, 5, 15, 24, 72, 120, 480 heures.

Le K libéré par échange Na-K est précipité sous forme de KTPB insoluble au sein de la suspension. Après blocage des sites de fixation du sol pour K par $NH_4$, le KTPB est solubilisé à l'aide d'acétone 75 p. cent. Le K extrait est alors dosé dans le filtrat selon la méthode de SCHULTE-COREY (1963).

## III. — RÉSULTATS

Les quantités de K libérées par les échantillons de sols en présence du réactif NaCl-NaTPB, pour des temps de contact de 1, 120 et 480 heures, sont réunies au tableau 2. Elles sont exprimées en méq. K pour 100 grammes de sol et en pourcentage du K total du sol correspondant. Les résultats obtenus pour certains échantillons de sols et pour l'ensemble des temps de contact sol-solution d'extraction utilisés, ont été reportés en figure 1 et 2 pour faire apparaître les différences de libération du K existantes en fonction des échantillons de sols.

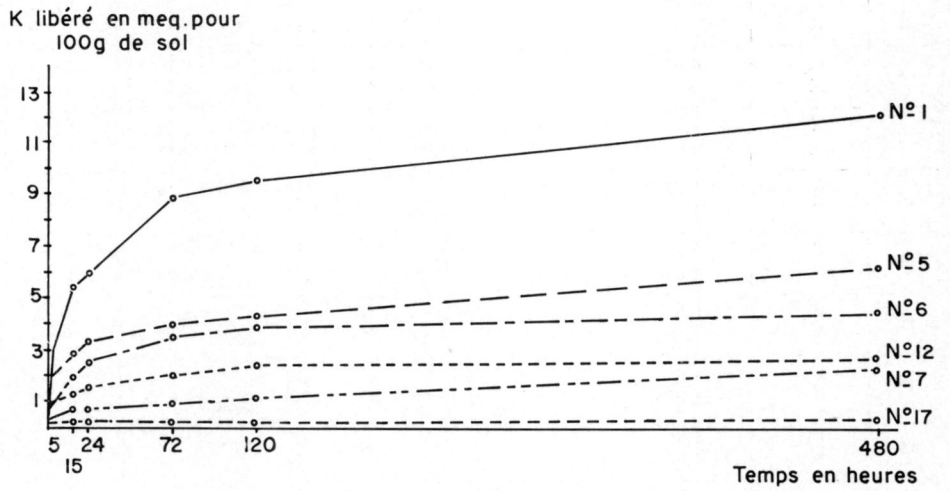



FIG. 1. — *Quantité de potassium libérée en fonction du temps de contact sol/solution d'extraction* (K en méq. p. 100 g sol). Parcelles $K_0$

On extrait dans tous les échantillons de sols des quantités de K croissantes avec le temps de contact sol-solution d'extraction (fig. 1). La vitesse de libération apparente du K, fonction de l'échantillon de sol étudié, décroît rapidement avec le temps de contact, sans pour cela s'annuler. Conformément aux études antérieures SMITH *et al.*, 1968 ; DUTHION, 1970), on vérifie pour les échantillons de sols étudiés)

TABLEAU 2

*K libéré par les sols en présence de NaCl-NaTPB*
($K_0$ : parcelles témoins — K : parcelles enrichies)

| N° sol | Traitement | K extrait | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | K exprimé en méq./100 g de sol | | | K exprimé en % du K total | | |
| | | 1 heure | 120 heures | 480 heures | 1 heure | 120 heures | 480 heures |
| 1 | $K_0$ | 1,99 | 9,49 | 12,15 | 6,59 | 31,44 | 40,26 |
| | K | 2,01 | 10,40 | 13,12 | 6,14 | 31,77 | 40,07 |
| 2 | $K_0$ | 3,05 | 14,18 | 22,74 | 9,17 | 42,65 | 68,39 |
| | K | 3,11 | 14,38 | 22,83 | 9,35 | 43,25 | 68,66 |
| 3 | $K_0$* | 1,05 | 3,58 | 5,89 | 2,68 | 9,15 | 15,05 |
| | K | 1,36 | 4,12 | 6,24 | 3,41 | 10,33 | 15,64 |
| 4 | $K_0$ | 1,64 | 4,09 | 5,95 | 3,71 | 9,25 | 13,45 |
| | K | 2,19 | 5,63 | 7,17 | 4,87 | 12,51 | 15,93 |
| 5 | $K_0$ | 1,64 | 4,35 | 6,27 | 3,69 | 9,78 | 14,09 |
| | K | 2,10 | 5,37 | 6,57 | 4,61 | 11,80 | 14,43 |
| 6 | $K_0$ | 0,33 | 3,90 | 4,51 | 0,32 | 3,76 | 4,35 |
| | K | 0,45 | 4,80 | 5,45 | 0,42 | 4,52 | 5,13 |
| 7 | $K_0$ | 0,36 | 1,18 | 2,40 | 1,98 | 6,50 | 13,22 |
| | K | 0,54 | 1,43 | 2,56 | 2,98 | 7,88 | 14,10 |
| 8 | $K_0$ | 0,33 | 2,10 | 2,36 | 1,47 | 9,33 | 10,49 |
| | K | 0,49 | 2,25 | 3,32 | 2,20 | 10,11 | 14,95 |
| 9 | $K_0$ | 0,41 | 2,10 | 3,63 | 1,42 | 7,27 | 12,56 |
| | K | 0,61 | 2,30 | 3,99 | 2,17 | 8,18 | 14,18 |
| 10 | $K_0$ | 1,07 | 4,04 | 5,78 | 3,21 | 12,15 | 17,38 |
| | K | 1,25 | 4,24 | 5,88 | 3,75 | 12,75 | 17,68 |
| 11 | $K_0$ | 0,99 | 3,63 | 4,86 | 3,23 | 11,83 | 15,84 |
| | K | 1,64 | 4,30 | 5,68 | 5,05 | 13,24 | 17,49 |
| 12 | $K_0$ | 0,68 | 2,40 | 2,81 | 9,19 | 32,43 | 37,97 |
| | K | 1,18 | 2,43 | 2,86 | 15,94 | 33,94 | 39,94 |
| 13 | $K_0$ | 1,04 | 11,15 | 13,11 | 2,46 | 26,42 | 31,06 |
| | K | 1,57 | 12,48 | 13,82 | 3,63 | 28,88 | 31,99 |
| 14 | $K_0$ | 0,98 | 3,94 | 5,58 | 2,88 | 11,58 | 16,41 |
| | K | 1,36 | 4,71 | 5,88 | 3,88 | 13,44 | 16,78 |
| 15 | $K_0$ | 1,15 | 3,12 | 4,35 | 3,57 | 9,68 | 13,50 |
| | K | 1,22 | 3,22 | 4,45 | 3,54 | 9,33 | 12,89 |
| 16 | $K_0$ | 0,13 | 0,45 | 0,47 | 8,66 | 30,00 | 31,33 |
| | K | 0,17 | 0,46 | 0,47 | 11,33 | 30,66 | 31,33 |
| 17 | $K_0$ | 0,20 | 0,32 | 0,35 | 20,00 | 32,00 | 35,00 |
| | K | 0,23 | 0,34 | 0,38 | 23,00 | 34,00 | 38,00 |

* La parcelle référence $K_0$ du n° 3 a reçu un apport moyen de 100 Kg/ha/an de $K_2O$.

l'existence d'une relation linéaire liant avec une forte probabilité ($0{,}90 < r < 0{,}95$) les quantités de K libérées et le logarithme du temps de contact (fig. 2).

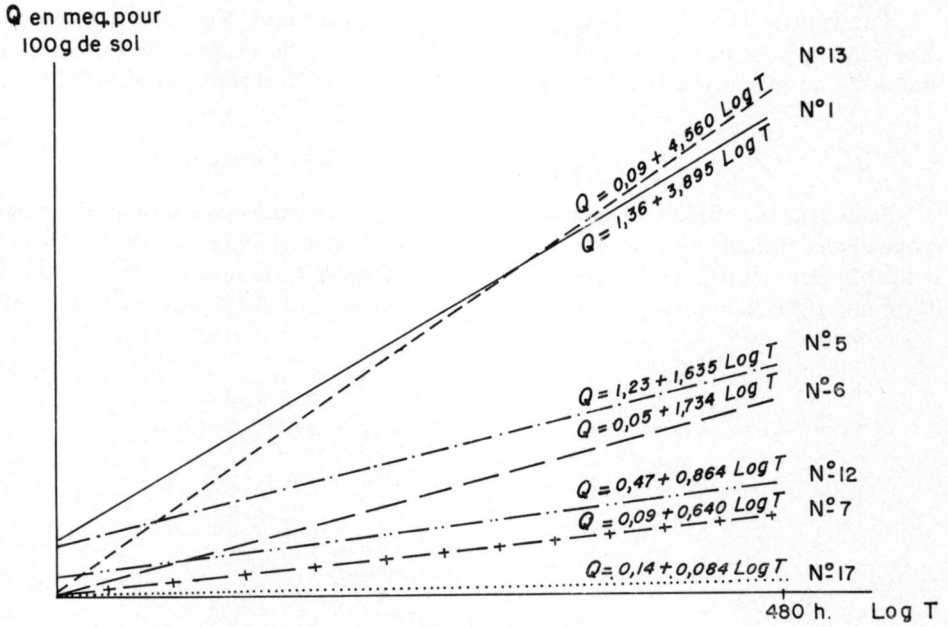



FIG. 2. — *Quantité de potassium libérée en fonction du logarithme du temps de contact sol/solution d'extraction.* Parcelles $K_0$

Cette relation est du type :

$$Q = a + b \log t$$

Elle fait apparaître la quantité théorique de potassium libérée au temps minimum de contact et la diminution ultérieure de la vitesse de libération lorsque le temps de contact augmente. En fait, si ce mode d'expression est représentatif de l'ensemble de la cinétique d'extraction du K par le NaTPB entre 1 heure et 480 heures, il rend imparfaitement compte de l'allure du phénomène pour les faibles temps de contact. C'est ainsi que les valeurs expérimentales obtenues avec le temps minimum de contact de 1 heure sont toujours sensiblement supérieures à celles qui pourraient être déduites de la formule logarithmique.

### 1. — *Relation K échangeable - K extractible au NaTPB*

Aucune relation générale n'existe entre les teneurs en K échangeable de l'ensemble des sols témoins et les quantités correspondantes de K extractible au NaCl-NaTPB. En particulier, pour le temps de contact minimum utilisé, T = 1 heure, les quantités de K extraites, toujours supérieures au K échangeable, sont indépendantes de celui-ci. La quantité de K ainsi extraite étant un multiple variable du K échangeable, il n'existe donc pas, dans le cadre de notre étude, de distinction entre la fraction K échangeable et la fraction K mobilisable : une teneur faible en K échan-

geable peut être partie d'une fraction K mobilisable soit élevée n° 13 (Moirans), soit faible n° 17 (Ampangabé) ; une fraction élevée en K échangeable peut être partie d'une fraction mobilisable soit élevée n° 2 (Beauchamp), soit faible n° 12 (Le Rafidin).

Par contre, la comparaison des échantillons provenant d'un même dispositif expérimental montre que la plus grande richesse en K de la parcelle fertilisée se manifeste au niveau du K échangeable et au niveau du K extrait par le NaTPB.

### 2. — *Réserves mobilisables des parcelles fertilisées*

Pour les sols étudiés, l'accroissement en réserves potassiques mobilisables des échantillons enrichis vis-à-vis de leurs témoins est essentiellement marqué pour des temps de contact égaux (ou inférieurs) à 120 heures. Dans une étude antérieure (CABIBEL, 1971), nous avons d'ailleurs montré que le K ainsi libéré provenait essentiel-

TABLEAU 3

*Accroissements de la réserve mobilisable de la parcelle fertilisée par rapport à celle de son témoin*

(en méq. pour 100 grammes de sol)

| Sol | Temps de contact | | |
|---|---|---|---|
| | 1 h | 120 h | 480 h |
| 1 | + 0,02 | + 0,89 | + 0,08 |
| 2 | + 0,06 | + 0,14 | — 0,11 |
| 3 | + 0,31 | + 0,23 | — 0,19 |
| 4 | + 0,55 | + 0,99 | — 0,32 |
| 5 | + 0,46 | + 0,56 | — 0,72 |
| 6 | + 0,12 | + 0,78 | + 0,04 |
| 7 | + 0,18 | + 0,07 | — 0,09 |
| 8 | + 0,16 | — 0,01 | — 0,11 |
| 9 | + 0,20 | 0,00 | + 0,16 |
| 10 | + 0,18 | + 0,02 | — 0,10 |
| 11 | + 0,65 | + 0,08 | + 0,09 |
| 12 | + 0,50 | — 0,47 | + 0,02 |
| 13 | + 0,53 | + 0,80 | — 0,62 |
| 14 | + 0,38 | + 0,39 | — 0,47 |
| 15 | + 0,07 | + 0,03 | 0,00 |
| 16 | + 0,04 | — 0,03 | — 0,01 |
| 17 | + 0,03 | — 0,01 | + 0,01 |

lement du K fixé sur la fraction argileuse. Pour des temps de contact supérieurs à 120 heures, les vitesses apparentes de libération du K dans un échantillon de sol enrichi et son témoin sont identiques. L'amplitude des accroissements ainsi obtenue, fonction du type de sol, de la fertilisation reçue et du passé cultural, est très variable, ainsi que le montre le tableau 3.

### 3. — *Relation K total - K extractible au NaTPB* (fig. 3)

Les quantités de K libérées dépendent de la teneur en K total des échantillons et de l'aptitude des minéraux constituant les sols à libérer leur K. Ces deux facteurs agissent simultanément et la quantité extraite ne représente que leur résultante. Une quantité de K libérée faible peut donc être le fait soit d'une teneur faible en K total, ce dernier pouvant être plus ou moins mobile, soit d'une teneur très élevée en K total par ailleurs très peu mobile. Inversement, à une teneur élevée en K total par ailleurs mobile, correspondra une libération importante de K.

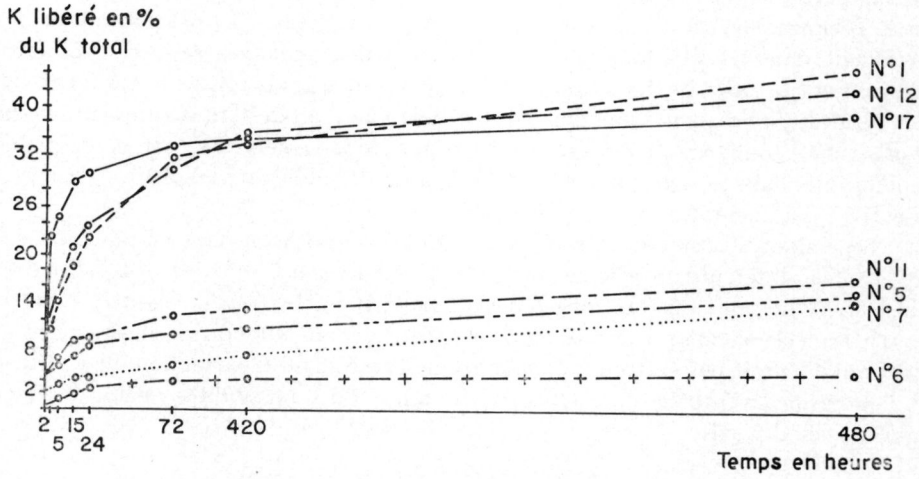



FIG. 3. — *Pourcentage du potassium total libéré en fonction du temps de contact sol/solution d'extraction.* Parcelles $K_0$

### 4. — *Classement des sols étudiés*

L'analyse des quantités de K libérées pour un même temps T de contact sol-solution d'extraction devrait donc théoriquement permettre de caractériser l'amplitude relative des réserves K mobilisables des sols et la mobilité apparente de leur K total, à condition qu'au temps T considéré, un palier d'extraction du K soit atteint dans tous les sols. Dans les résultats obtenus expérimentalement, l'existence d'un tel palier n'apparaît pas (fig. 1 et 3). Cependant l'examen de l'ensemble des résultats permet le classement suivant des sols :

Groupe I : Sols possédant des réserves potassiques mobilisables faibles à très faibles et dont le K total peut être très mobile (nos 12-16-17) ou peu mobile (nos 7, 8, 9).

Groupe II : Sols possédant des réserves potassiques mobilisables moyennes et dont le K total peut être peu mobile (nos 3, 4, 5, 10, 11, 14, 15) ou même très peu mobile (no 6).

Groupe III : Sols possédant des réserves potassiques mobilisables élevées à très élevées et dont le K total est très mobile (nos 1, 2, 13).

*Ce classement ainsi obtenu est indépendant du temps de contact sol-solution d'extraction.* Deux sols font cependant exception, les nos 6 et 13, les quantités de K libérées y étant relativement plus faibles pour les temps de contact les plus courts.

## IV. — DISCUSSION

Dans une étude antérieure utilisant le test Stanford-De Ment, nous avions montré que certains sols présentement étudiés possédaient, sous cultures, des possibilités importantes de libération en K, possibilités indépendantes de leur teneur initiale en K échangeable. De plus, la majeure partie du K prélevé par des plantules d'orge provenait, dans ces sols, de réserves K non initialement échangeables, une très faible diminution du taux de K échangeable étant mesurée après culture (CABIBEL, 1972). Ces résultats, rejoignant ceux mis en évidence lors d'études antérieures (BLANCHET *et al.*, 1967), soulignaient l'intérêt de l'évaluation des réserves K non échangeables mobilisables dans les sols comme l'un des critères d'appréciation de leurs possibilités effectives d'alimentation vis-à-vis des récoltes.

Cependant, l'action du tétraphénylborate de Na pouvant dans certains types de sol être très différente de celle des racines (BLANCHET *et al.*, 1967) et la totalité du K ainsi libéré ne pouvant être considérée comme disponible pour la plante (DUTHION, 1971), seule la comparaison des résultats obtenus au laboratoire et des résultats culturaux devrait permettre un étalonnage de la méthode d'extraction du K utilisée et l'obtension éventuelle d'un critère déterminant des possibilités réelles d'alimentation en K des sols.

### 1. — *Comparaison des deux types de résultats*

L'évaluation relative des réponses moyennes obtenues au champ vis-à-vis des apports potassiques pour les cultures installées dans les sols étudiés et indiquées au tableau 1, permet en première approximation un classement des sols en fonction du type de réponse obtenue. Ces sols peuvent se regrouper en trois classes :

Classe I : Sols où la réponse aux apports potassiques est positive pour des cultures peu exigeantes en K (sols nos 7, 8, 9, 12, 16, 17).

Classe II : Sols où la réponse aux apports potassiques est positive pour des cultures exigeantes en K (sols nos 3, 4, 6, 10, 11, 13, 14, 15).

Classe III : Sols où la réponse aux apports potassiques est nulle (sols nos 1, 2, 5).

Une telle classification nécessite cependant de nombreuses réserves. En effet, elle est établie d'après les résultats expérimentaux obtenus localement et la comparaison des résultats entre eux s'avère d'une extrême complexité, les conditions expé-

rimentales n'étant pas identiques mais fonction de nombreux facteurs liés au climat, aux façons culturales mises en œuvre, à l'antériorité culturale, au type de culture propre à chaque essai. Une telle classification est donc subjective et ne prétend représenter que les tendances relatives propres à chacun des essais quant au type de réponse obtenu vis-à-vis des apports de potasse.

Le classement des sols ainsi établi, exception faite des sols nos 5 et 13 est celui généralement obtenu lorsque le critère de classement est la quantité de K libérée en présence de NaTPB. Cette analogie de classement montre que :

— à une réserve K mobilisable faible ou très faible dans le sol (groupe I) correspond une réponse positive des cultures aux apports potassiques (classe I), la réponse étant d'autant plus forte que la réserve du sol est faible et l'exigence de la culture en K plus élevée ;

— à une réserve K mobilisable moyenne dans le sol (groupe II) correspond une réponse généralement nulle des cultures peu exigeantes en K et une réponse positive des cultures exigeantes en K vis-à-vis des apports de potassium (classe II) ;

— à une réserve K mobilisable élevée dans le sol (groupe III) correspond une réponse nulle des cultures vis-à-vis des apports de K (classe III).

Il est intéressant de comparer ce classement avec celui qui aurait pu être fait avec les valeurs obtenues pour le K échangeable. Cette seule considération aurait permis de diagnostiquer la pauvreté des sols du groupe I. Elle ne rend pas compte, par contre, des différences de comportement des sols des groupes II et III.

### 2. — *Critère de classement*

L'utilisation du NaTPB permet dans les sols étudiés, de déplacer dans les conditions expérimentales choisies, des quantités de K très supérieures à leur K échangeable. Bien qu'aucune discontinuité ne semble exister au cours de l'extraction, il paraît cependant probable que les fractions K NaTPB les plus mobilisables sont également celles susceptibles d'être le plus facilement utilisées par la plante, les distances de diffusion pour le K étant alors les plus faibles. *Dès lors, la fraction de K NaTPB libérée au temps de contact sol-solution d'extraction le plus court pourra constituer, quelles que soient les quantités de K libérées pour des temps de contact plus longs, un facteur d'appréciation des disponibilités en K du sol pour les cultures.*

Ceci est particulièrement mis en évidence dans le sol no 13. Pour des temps de contact longs, la quantité de K mobilisée par le réactif est élevée, alors que les possibilités réelles d'alimentation en K vis-à-vis des cultures sont faibles comme le montrent les résultats culturaux (réponse positive importante du maïs aux apports de K). Les possibilités réelles d'alimentation en K de ce sol paraissent sous la dépendance, non des réserves K mobilisables globales, mais des réserves K non initialement échangeables les plus mobilisables, déterminées au temps T de contact le plus court.

Pour les échantillons de sols étudiés, la comparaison des quantités de K extraites en présence de NaCl-NaTPB pour les divers temps de contact utilisés et des résultats culturaux montre une parfaite correspondance entre les quantités de K extraites à 1 heure et la réponse des cultures au champ vis-à-vis des apports potassiques. La comparaison de la parcelle témoin et de la parcelle enrichie d'un même dispositif confirme également l'intérêt d'un temps d'extraction limité.

## CONCLUSIONS

La technique d'extraction du K par le NaTPB ne peut être considérée que comme un test de disponibilité du K des sols. Les résultats acquis ne peuvent en effet être extrapolés sans grandes précautions aux conditions de croissance des plantes dans le milieu naturel et cela d'autant plus qu'il doit exister, au niveau des racines, des équilibres d'échange plante-sol facilitant plus ou moins l'extraction du K, équilibres d'échange différents de ceux mis en œuvre au cours de l'extraction du K par le NaTPB. D'autre part, l'absence d'un palier dans la cinétique d'extraction du K de l'ensemble des sols par le réactif ne permet pas de dégager un état caractéristique des réserves mobilisées.

Sous ces réserves, les possibilités de fourniture du K aux cultures par les sols paraissent sous la dépendance des réserves K les plus mobilisables déterminées en présence de NaTPB lors d'un temps de contact sol-solution de une heure.

*Reçu pour publication en janvier 1972.*

## SUMMARY

### RELEASING THE POTASSIUM OF SOILS BY NaTPB IN RELATION WITH THE GROWTH OF CROPS

The release of potassium from soils was investigated, using the reagent NaCl/NaTPB and involving 34 samples of soils differing in origin or maintenance of their K content but all of which formed part of long-term experimental systems whose response to potassium input was well known.

Comparing, in the samples of soils investigated, the amounts of K extracted with NaCl/NaTPB over the different contact times utilized and the crop production shows agreement between the amounts of K extracted in one hour and the response of field crops with respect to potassium inputs.

## ZUSAMMENFASSUNG

### MOBILISIERUNG DES BODENKALIUMS DURCH NATPB IN BEZIEHUNG ZU DEM VERHALTEN DER KULTUREN

Die Befreiung des Kaliums durch die Böden wurde mit Hilfe des Reagenz NaCl-NaTPB untersucht. Die Untersuchung bezog sich auf 34 Stichproben von verschiedenen Böden hinsichtlich ihrer Herkunft oder Erhaltung ihres Kaliumniveaus, die aber alle zu langfristigen experimentalen Versuchen gehörten, deren Reaktionen gegenüber Kaliamzafuhren bekannt war.

Was die untersuchten Bodenstichproben anbetrifft, so geht aus dem Vergleich der in Gegenwart von NaCl-NaTPB extrahierten K — Mengen für die verschiedenen angewandten Koëtaktzeiten und für die Ergebnisse aus den Kulturen hervor, dass eine Uebereinstimmung zwischen den während einer Stunde extrahierten K - Mengen und den Reaktionen der Feldkulturen gegenüber den Kaliumszufuhren besteht.

## РЕЗЮМЕ

Мобилизация калия почв тетрафенилбораторм натрия в связи с поведением культур.

Б. КАБИБЕЛЬ.

Освобождение калия почвами изучалось с помощью реактива NaCl–NaTPB. Изучение проводилось на 34-х образцах почв разного происхождения и с различным содержанием калия, но принадлажавших к экспериментальным диспозитивам длительных сроков и с известной реакцией на внесение калия.

В образцах изученных почв, сравнение количеств экстрагированного в присутствии NaCl–NaTPB калия, в течении контактов различной длительности и результатов различных культур, выявляет соответствие между количествами этого элемента, извлеченными в течении одного часа, и реакциями разных полевых культур на калиевые подкормки.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BLANCHET R., BOSC M., 1967. Bilans de potassium et alimentation potassique des plantes en présence de rétrogradations et de libérations d'ions K non échangeables. *Ann. agron.*, **18**, 6, 601-621.

CABIBEL B., 1971. Libération du potassium par les fractions granulométriques du sol en présence de tétraphénylborate de sodium. *Ann. agron.*, **22**, 6, 705-716.

CABIBEL B., 1972. Mobilisation du potassium du sol au cours d'une culture Stanford-De Ment. *Ann. agron.*, **23**, 1, 101-114.

DUTHION C., 1966. Réserve de potassium lentement libérable d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 90-97.

DUTHION C., GROSMAN RUTH, 1970. Potassium lentement libérable : Quelques essais de bilans culturaux. *Ann. agron.*, **21**, 57-73.

DUTHION C., GROSMAN RUTH, 1971. Utilisation de tétraphénylborate de sodium pour l'extraction du potassium des sols et applications agronomiques. *Sci. Sol*, 79-92.

GEILMAN W., GEBAUER W., 1953. Zur fallung der alkalimetalle abs tetraphenylborverbindungen. *Z. Anal. Chem.*, **139**, 161-181.

JACKSON M. L., 1958. *Soil Chemical analysis*. Prentice-Hall, Inc.

SCHULTE E. E., COREY R. B., 1963. Flame photometrie determination of potassium precipitated in soil as potassium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 185-188.

SCOTT A. D., HUNZIKER R. R., HANWAY J. J., 1960. Chemical extraction of K from soils and micaceous minerals with solutions containing Na tetraphenylboron. I. Preliminary experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 191-194.

SMITH S. J., CLARK L. J., SCOTT A. D., 1968. Exchangeability of potassium in soils. *IX^e Congrès de la Science du Sol*. Adelaïde, 661-669.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (3), 369-374.

NOTE

# ESSAI D'APPLICATION DES PROPRIÉTÉS DE L'ÉTHYLÈNE-GLYCOL A LA DÉTERMINATION DU POTASSIUM DES SOLS UTILISABLE PAR LES VÉGÉTAUX

C. DUTHION
avec la collaboration technique de Josiane MORTIER

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,*
*21 - Dijon*

## RÉSUMÉ

Les essais d'utilisation de l'éthylène-glycol — qui a la propriété de pénétrer entre les feuillets de certains minéraux argileux, provoquant ainsi leur écartement — se sont révélés décevants pour la détermination du potassium utilisable des sols.

L'éthylène-glycol a la propriété de pénétrer dans les espaces interfoliaires de certains minéraux argileux, provoquant un écartement de leurs feuillets. Le traitement d'un échantillon de sol par le glycol pourrait donc rendre accessibles aux réactifs d'extraction les ions $K^+$ retenus dans ces espaces, qui constituent les réserves éventuelles du sol. Il fournirait là un moyen d'apprécier le potassium utilisable par les plantes.

## SOLS ÉTUDIÉS

Les deux sols sur lesquels ont porté les essais ont été décrits par ailleurs, aussi bien du point de vue analytique que comportement cultural (DUTHION, 1966 ; DUTHION et Ruth GROSMAN, 1971) ; ce sont :

— Marigny-le-Cahouet, sol brun sur marnes du Lias ; 65 p. 100 d'argile comprenant, par ordre de proportion décroissante, des minéraux de type kaolinite, illite ou mica, des minéraux gonflants vers 13 Å.

— Bretenière, sol brun sur alluvions fluviatiles ; 45 p. 100 d'argile comprenant un ensemble (10-14 Å), représenté par des feuillets de type illite et surtout des édifices interstratifiés (10-14 M) et (10-14 V), et de la kaolinite.

## PRÉSENTATION DES ESSAIS ET RÉSULTATS

### 1. — *Utilisation de l'éthylène-glycol en prétraitement*

L'échantillon de sol est mis en contact avec le glycol pendant un temps déterminé (10 g sol + 10 cm³ glycol ; temps de contact : 48 h, après essais). Le glycol est ensuite déplacé par un lavage à l'eau ou avec une solution NaCl 0,1 N ; les percolats de lavage sont retenus pour détermination du K éventuellement entraîné (environ 50 p. 100 du K total extrait pour les lavages avec une solution NaCl). Le sol est enfin percolé par l'acétate d'ammonium (technique du K échangeable).

Ce protocole permet de déplacer un peu plus que K échangeable (tabl. 1 : les chiffres correspondant à la technique glycol représentent la somme de K déplacé par les lavages et la percolation acétate $NH_4$).

TABLEAU I

*K extrait* (me./100 g de sol) — *Prétraitement par le glycol*

| | Marigny-le-Cahouet LS C 5 | Bretenière LD |
|---|---|---|
| K échangeable ..... | 0,38 | 0,53 |
| K extrait après contact 48 h avec 10 cm³ glycol : | | |
| lavage 400 cm³ $H_2O$..... | 0,44 | 0,60 |
| lavage 200 cm³ NaCl 0,1 N ..... | 0,52 | 0,71 |
| lavage 400 cm³ NaCl 0,1 N ..... | 0,57 | 0,73 |
| K extrait après contact 48 h avec 10 cm³ $H_2O$ : | | |
| lavage 200 cm³ NaCl 0,1 N ..... | 0,44 | 0,67 |
| lavage 400 cm³ NaCl 0,1 N ..... | 0,49 | 0,70 |

Le prétraitement par le glycol a bien une action spécifique. Cependant, les quantités de K ainsi extraites en supplément à K échangeable sont toujours faibles, et d'autant plus, apparemment, que l'échantillon est plus riche (tabl. 2 : K extrait technique glycol avec lavage à l'eau).

Les données du tableau 2 se rapportent à des échantillons Bretenière prélevés sur des parcelles expérimentales, avant et après cultures ; les traitements appliqués ont entraîné des variations sensibles des teneurs en K échangeable mais aussi en K fixé (lentement échangeable), ce dernier évalué à l'aide de la technique tétraphénylborate de sodium (extraction par une solution NaCl N-NaTPB 0,05 N, contact 5 jours). Les valeurs fournies pour ces échantillons par la technique glycol décrite précédemment ne permettent pas, à l'évidence, de rendre compte des résultats culturaux.

Différentes modifications ont été apportées successivement au protocole : extractions répétées sur un même échantillon ; élimination du lavage et apport de glycol (10 p. 100 en volume) dans la solution d'acétate $NH_4$, la présence d'une petite quantité de glycol permettant, d'après

Mac KENZIE cité par GRIM (1953) de maintenir l'écartement du complexe montmorillonite-glycol ; présence d'ions $Na^+$ ou $Ca^{++}$ pendant le contact sol-glycol ; remplacement du glycol par le glycérol (facteur stérique). Elles conduisent à des résultats du même ordre que ceux déjà obtenus ou parfois inférieurs.

TABLEAU 2

*Évolution des valeurs de K pour quelques parcelles expérimentales Bretenière* (me./100 g de sol)

| Échantillon initial | | | Échantillon final | | | Δ K fixé (K fixé final — K fixé initial) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Référence | K échangeable | K extrait prétraitement glycol | Référence | K échangeable | K extrait prétraitement glycol | |
| GE I 2 | 0,60 | 0,64 | MJ I 2 15-30 | 0,48 | 0,57 | — 0,14 |
| GD IV 2 | 0,92 | 0,98 | MJ IV 2 0-15 | 0,78 | 0,74 | — 0,36 |
| GE IV 2 | 0,55 | 0,63 | MJ IV 2 15-30 | 0,46 | 0,61 | — 0,21 |
| OD I B 2 0-5 | 1,24 | 1,22 | RJ I B 2 0-5 | 2,38 | 2,00 | + 1,83 |

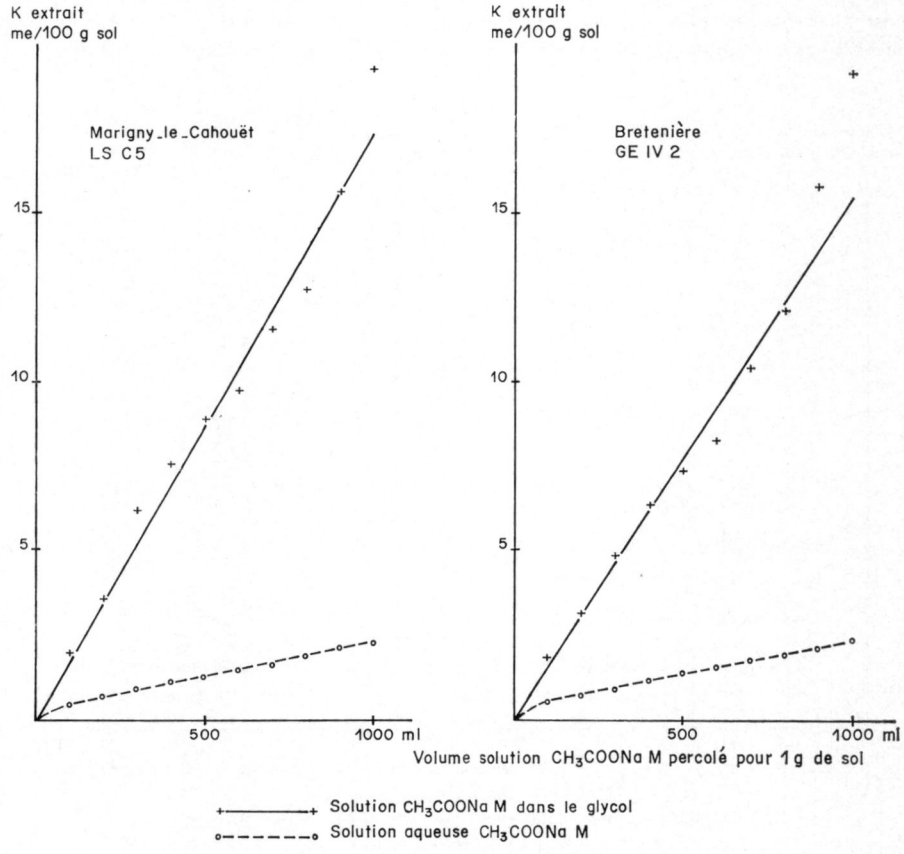



FIG. 1. — *Courbes d'extraction de K*

### 2. — *Extraction du potassium en milieu glycol*

Tenant compte des observations faites précédemment, nous avons transformé le protocole expérimental de façon à maintenir pendant toute la durée de l'extraction du K les conditions réalisées lors du contact préalable sol-glycol : par la suppression du lavage et l'utilisation d'une solution de percolation dont le solvant est le glycol (la valeur de sa constante diélectrique permettant une dissociation ionique assez forte). D'autre part, nous avons constaté que les ions $Na^+$, dans les conditions opératoires ainsi imposées (milieu glycol), s'échangent plus facilement contre les ions $K^+$ que les ions $NH_4^+$.

Le protocole est donc devenu le suivant :

— sol + glycol en contact pendant 48 heures,
— percolation par une solution d'acétate de sodium M dans le glycol.

Pratiquement, nous avons travaillé sur un gramme de sol afin de pouvoir assurer un rapport percolat/sol aussi grand que possible sans avoir à manipuler des volumes trop importants.

Sous cette forme, la technique glycol est beaucoup plus efficace.

Elle ne permet cependant pas de donner de K extractible une valeur bien définie qui ait, par ailleurs, une signification agronomique. Étudiant en effet la marche de l'extraction en dosant K libéré dans les fractions successives du percolat, nous n'avons pu atteindre de limite apparente. La figure 1 donne un exemple de tels résultats où sont portées les quantités cumulées de K extrait ; il existe, dans les limites de nos essais, une certaine proportionnalité entre la quantité de potassium libéré et le volume de solution percolée.

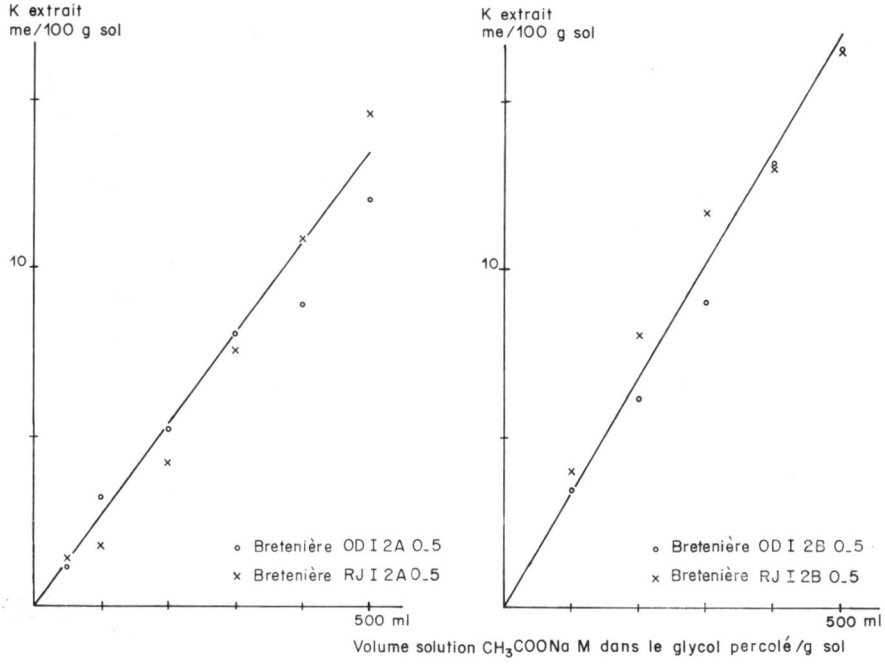



FIG. 2. — *Courbes d'extraction de K*
*Parcelles expérimentales ayant subi un fort enrichissement en K*

o échantillon initial
x échantillon enrichi

En outre, la dynamique de l'extraction de K varie peu pour des échantillons d'un même sol portés à des niveaux de richesse pourtant assez différents. La figure 2, qui concerne des échantillons prélevés sur des parcelles Bretenière avant et après un très fort enrichissement en potassium, illustre bien cette observation.

## CONCLUSION

Le contact préliminaire du sol avec l'éthylène-glycol rend possible l'extraction d'ions $K^+$ non échangeables au sens habituel du terme.

Les deux modes opératoires expérimentés sont d'efficacité très différente ; ils ne permettent pas la détermination du potassium utilisable par les végétaux.

Le premier, qui comprend l'élimination du glycol préalablement à l'extraction proprement dite, est d'une efficacité limitée et ne rend pas compte des résultats culturaux.

Le second, dans lequel l'extraction de K est faite en milieu glycol, permet de libérer des quantités de potassium très supérieures à K échangeable. Aucune limite apparente à l'extraction n'a été atteinte dans ces conditions opératoires. La dynamique de l'extraction ne permet pas d'autre part de différencier des échantillons d'un même sol diversement enrichis.

Les résultats présentés montrent que l'utilisation de l'éthylène-glycol n'apporte pas de solution nouvelle au problème posé.

*Reçu pour publication en janvier 1972.*

## SUMMARY

### TESTING THE PROPERTIES OF ETHYLENE-GLYCOL APPLICABLE TO DETERMINATION OF THE POTASSIUM AVAILABLE FOR PLANTS IN VARIOUS SOILS

Testing ethylene-glycol, which has the property of infiltrating between layers of some clayey minerals thereby spreading the former apart, proved to be deceptive for determining the potassium available for plants in various soils.

## ZUSAMMENFASSUNG

### VERSUCH ZUR BENUTZUNG DER EIGENSCHAFTEN DES ÄTHTLENGLYKOLS FÜR DIE BESTIMMUNG DES FÜR DIE PFLANZEN BRAUCHBAREN BODENKALIUMS

Die Vesrsuche zur Benutzung von Aethylenglykol, das die Eigenschaft besitzt, zwischen den Blättchen verschiedener tonartigen Mineralien einzudringen und dadurch ein Aufspalten derselben zu verursachen, haben sich als entäuschend für die Bestimmung des brauchbaren Bodenkaliums erwiesen.

## РЕЗЮМЕ

Аналитическая заметка : Опыт применения этилен-гликоля для определения калия почв усвояемого растениями.

К. ДЮТИОН.

Опыты применения этилен-гликоля, обладающего свойством проникать между пластинок некоторых глинистых минералов, вызывая таким образом их раздвигание, для определения калия почв усвояемого растениями, не оправдали возлагавшихся на них надежд.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


DUTHION C., 1966. Réserve de potassium libérable d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric.*, 90-97.

DUTHION C., GROSMAN Ruth, 1971. Utilisation du tétraphénylborate de sodium pour l'extraction du potassium des sols et applications agronomiques. *Sci. Sol*, 1, 1-13.

GRIM R. E., 1953. *Clay Mineralogy*. Mac Graw-Hill Publishing Company, London.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions ;* f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part.* Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

*Envoi du manuscrit :* M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Correction des épreuves :* les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

AGRONOMIE.

# annales agronomiques

Bimestriel

1972

Vol. 23 . N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 379-406.

# EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX (*)

## III. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers, variations négatives d'humidité

R. GRAS

*Station d'Agronomie.*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

Le système terre fine-élément grossier préalablement humecté est soumis à la dessiccation.

Lorsque les éléments grossiers ne sont pas poreux, ils modifient seulement le déplacement de l'eau dans le sable.

Si les éléments grossiers sont poreux, ils cèdent de l'eau au sable sous forme liquide lorsque celui-ci est suffisamment desséché pour que des pores fins puissent se remplir d'eau au détriment de l'élément grossier.

La quantité d'eau qui passe ainsi de l'élément grossier à la terre fine dépend du couple élément grossier-terre fine et de l'humidité de la terre fine.

## INTRODUCTION

La dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers est étudiée ici lorsque le système se dessèche, ce qui correspond aux processus naturels d'évaporation ou d'absorption d'eau par les racines des végétaux.

On examine en particulier le transfert d'eau sous forme liquide de l'élément grossier au sable en voie de dessèchement, parce que un tel transfert permet aux éléments grossiers poreux de contribuer à l'alimentation en eau de la végétation.

L'éventualité d'une extraction directe de l'eau des éléments grossiers par les poils absorbants des racines n'est pas à exclure, mais elle n'a pas été étudiée ici.

(*) Ce travail fait partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

# I. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS NON POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU D'UN SOL EN VOIE DE DESSÈCHEMENT

Dans le milieu naturel, le sol à la capacité au champ se dessèche à la suite de l'évaporation directe ou de l'absorption d'eau par les racines des végétaux.

## 1. 1. — *Dispositif expérimental*

Pour simuler l'effet de l'évaporation ou de l'absorption des racines, on pouvait soumettre une des extrémités d'un tube plein de sable de Fontenay humide au chauffage d'une ampoule électrique. Malheureusement, on provoque ainsi des circulations parasites d'eau à la suite de condensations dans les zones plus froides éloignées de la source de chaleur (COLLIS-GEORGE *et al.*, 1963). Pour éviter cet inconvénient, nous avons extrait l'eau en plaçant du silicagel au contact du sol (PUECH, 1966). Au cours de l'expérience, le silicagel s'humidifie et son pouvoir absorbant diminue. On pallie en partie cet inconvénient en utilisant un appareil inspiré de celui de PUECH (1969) : l'absorption de l'eau est répartie sur une grande quantité de silicagel qui est renouvelée au contact du sol par le brassage d'une hélice (fig. 1). On peut ainsi extraire l'eau de deux tubes en même temps. L'expérience a duré 7 heures 15 minutes et on a fait tourner les tubes autour de leurs axes horizontaux tous les trois quarts d'heure, afin de diminuer les différences d'absorption dues au fait que le renouvellement du silicagel était moins intense dans la partie inférieure du tube à cause du léger espace libre ménagé pour éviter l'éboulement de la terre du tube. Au cours de l'expérience, on a remplacé une partie du silicagel de l'appareil par du silicagel sec.

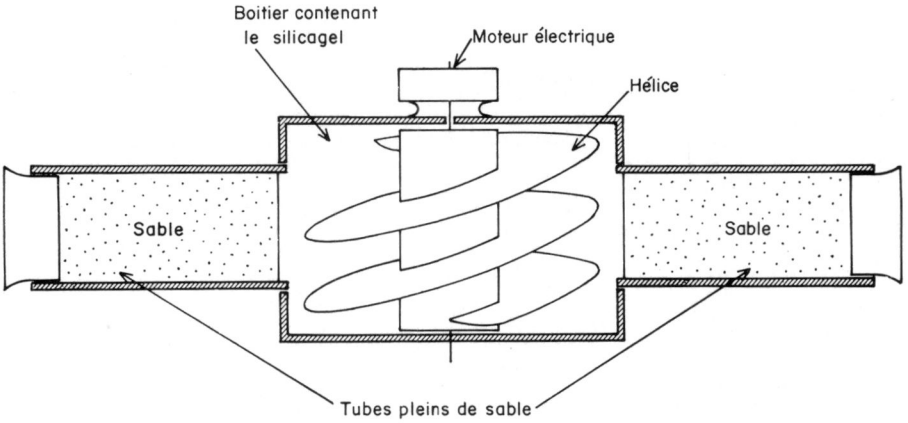



FIG. 1. — *Appareil permettant d'extraire l'eau à l'aide de silica-gel*

On compare un tube témoin et un tube d'essai. Les tubes ont un diamètre intérieur de 5,3 cm et contiennent du sable sur 11 cm d'épaisseur. Ils sont remplis de la façon suivante : le sable est jeté par fraction de 50 g dans le tube partiellement rempli d'eau ; après chaque apport de sable, on élève un peu le niveau d'eau.

Dans le tube d'essai, on place au sein du sable un cylindre de plastique rigide (rayon = 2 cm, hauteur = 4 cm) ; la surface de section occupée par le sable passe ainsi de 22,0 $cm^2$ à 9,4 $cm^2$ ; pour éviter que ce cylindre ne se déplace à l'intérieur du sable humide, on a utilisé un dispositif ainsi conçu (fig. 2) : le cylindre est attaché par des fils métalliques à un support de fil de fer rigide qui rentre exactement dans le tube. Celui-ci est rempli de sable comme le tube témoin. Une fois le remplissage terminé, l'excès d'eau est enlevé, d'abord par simple égouttage, puis par applica-

tion d'un vide modéré. Le tube est ensuite bouché et placé horizontalement pendant une nuit, pour que son humidité s'homogénéise. Cette façon de procéder permet d'obtenir une humidité du sable plus régulière que celle que l'on obtiendrait en humectant le sable sec par capillarité, ou en laissant se ressuyer le sable préalablement saturé après remplissage à sec.

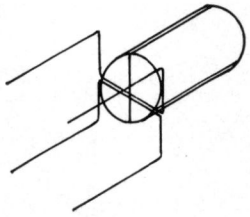


FIG. 2. — *Montage fixant la position de l'élément grossier dans le sable humide*

### 1. 2. — *Résultats*

On compare le tube d'essai et le tube témoin placés pendant le même temps sur l'appareil à silicagel. La perte d'eau totale de chaque tube a été rapportée à la quantité d'eau totale initiale, qui, pour la même humidité du sable, diffère du tube témoin au tube avec élément, du fait de la présence de ce dernier (tabl. 1).

TABLEAU I

*Extraction d'eau par le silicagel*

| Tubes | | Humidité moyenne initiale du sable (%) | Eau extraite (% de la quantité d'eau initiale) |
|---|---|---|---|
| Expérience 1 | Tube témoin.. | 24,6 | 19,6 |
| | Tube avec élément ..... | 23,2 | 18,9 |
| Expérience 2 | Tube témoin.. | 43,0 | 29,2 |
| | Tube avec élément ..... | 43,7 | 27,3 |

On constate que, pour une expérience donnée, l'humidité initiale en p. 100 de sable sec étant à peu près la même, le rapport de la quantité d'eau extraite à la quantité initiale n'est pas sensiblement modifié par la présence d'un élément grossier non poreux dans le sable.

La figure 3 représente les profils hydriques à la fin de l'expérience. Leur examen fait apparaître les points suivants :

— la présence de l'élément grossier n'empêche pas le dessèchement de se manifester dans la partie du tube la plus éloignée de la zone d'extraction ;

— l'humidité du sable est plus élevée au voisinage de l'élément grossier que dans les parties correspondantes des tubes témoins. Ce supplément d'humidité, parti-

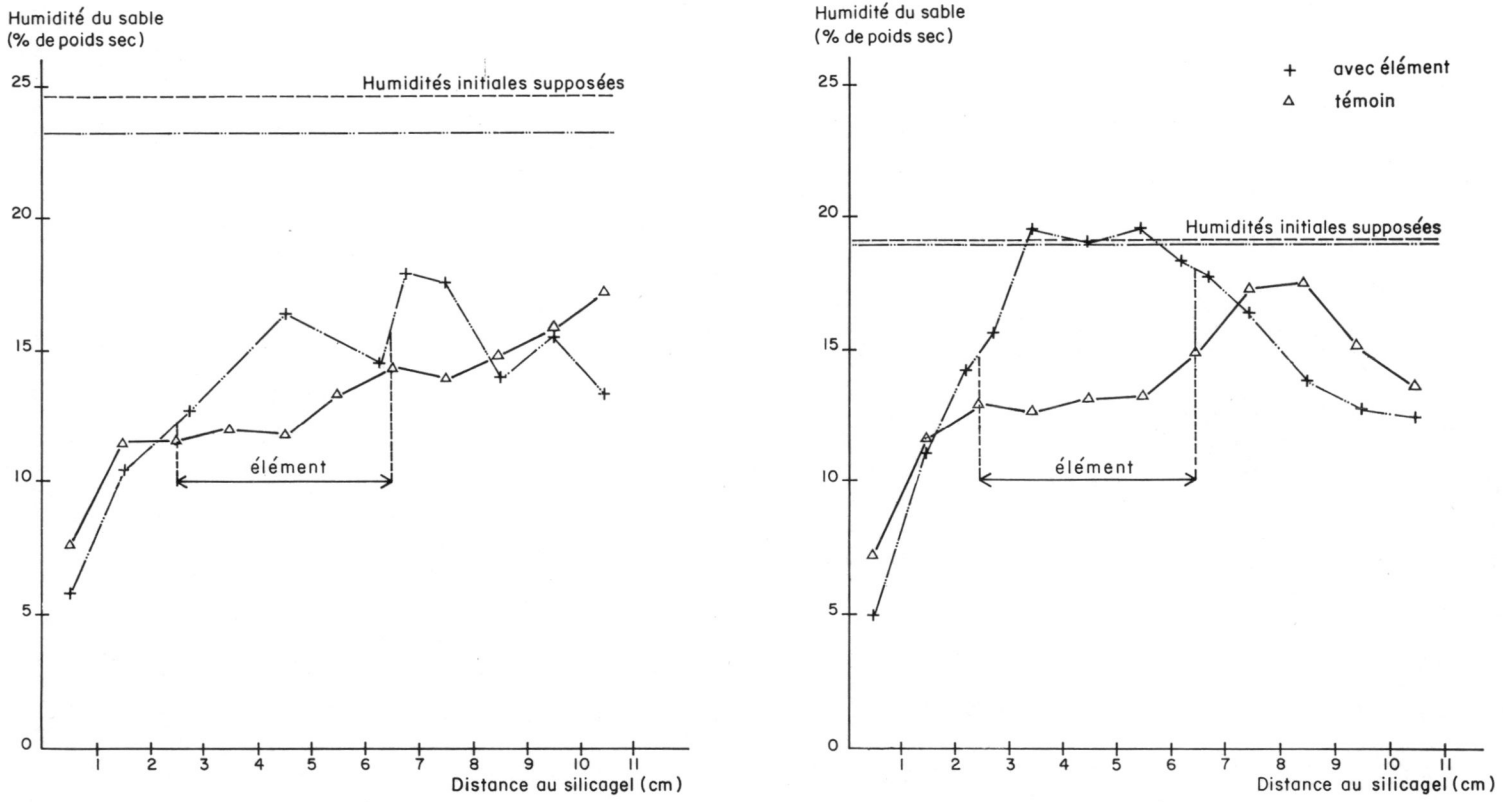



FIG. 3. — *Effet d'un élément grossier non poreux sur la dessiccation d'un sable. Profils hydriques*
*a* : humidité initiale élevée *b* : humidité initiale faible

culièrement net sur la figure 3 *b*, ne peut être attribué au hasard et il est difficile de l'expliquer par une différence de tassement du sable à côté de l'élément. L'eau se déplacerait donc d'une couche relativement sèche vers une couche plus humide, comme l'ont signalé HALLAIRE et HÉNIN (1958). La diminution de section provoquée par l'élément suggère l'existence d'un mécanisme compensateur qui se traduirait par une augmentation de la quantité d'eau en transit dans l'espace annulaire autour de l'élément.

## II. — TRANSMISSION D'EAU DE L'ÉLÉMENT RIGIDE AU SABLE

Le transfert d'eau de l'élément poreux rigide au sable peut s'effectuer sous forme liquide ou gazeuse. Dans ce dernier cas, il faut que la tension de vapeur d'eau soit plus faible dans l'espace poral du sable que dans celui de l'élément ; la diffusion provoque alors le transfert de certaines molécules d'eau du corps poreux vers le sable. Ce mécanisme peut coexister avec le transfert sous forme liquide, la vapeur d'eau pouvant se condenser dans des pores si la température y est suffisamment basse.

Le transfert sous forme gazeuse peut avoir quelque importance dans des conditions particulières, mais il est probable que le transfert sous forme liquide met en jeu des quantités d'eau plus grandes que la diffusion de la vapeur. Par ailleurs, c'est sous la forme liquide que l'eau intervient le plus efficacement pour la nutrition minérale et l'alimentation en eau ; l'eau passe alors de l'élément grossier au sol et du sol à la racine. Pour toutes ces raisons, nous nous limiterons au transfert isotherme d'eau sous forme liquide.

Pour étudier ce transfert, on réalise un dispositif expérimental qui, en diminuant la teneur en eau du sable autour de l'élément, rend possible un déplacement éventuel de l'eau de l'élément vers le sable. Il s'agit donc, en principe, de dessécher le sable et d'examiner si l'élément grossier qui s'y trouve perd alors de l'eau.

En fait, une telle expérience ne saurait montrer sans ambiguïté que le transfert s'est effectué sous forme liquide, puisqu'un corps poreux peut perdre de l'eau du seul fait de l'évaporation, pourvu que l'expérience dure assez longtemps.

Pour savoir sous quelle forme l'eau se déplace, on remplit alors l'élément poreux rigide d'eau marquée avec un sel, qui se déposera dans le corps rigide si l'eau s'y évapore (transfert gazeux), ou au contraire se déplacera avec elle dans le sable où on le retrouvera (transfert liquide). Mais, même en l'absence de tout mouvement de l'eau, le marqueur se déplacera par diffusion, de façon que sa concentration tende à devenir la même pour l'eau de l'élément grossier et l'eau du sable. Il faut donc disposer d'un témoin permettant d'évaluer la teneur en sel dans le sable au voisinage du corps grossier, en l'absence de tout mouvement de l'eau ; ce témoin est difficile à réaliser puisque, au cours de l'expérience, la teneur en eau diminue constamment dans le sable, ce qui modifie l'intensité de la diffusion par l'intermédiaire de la section occupée par l'eau.

Nous avons donc mis d'abord en évidence de façon qualitative qu'il y avait bien un transfert d'eau sous forme liquide ; par la suite, on a précisé l'importance quantitative de ce transfert.

## 2. 1. — *Mise en évidence d'un transfert d'eau sous forme liquide*

### 2. 11. *Méthode.*

On a utilisé le procédé décrit dans la section 1. 1. Il consiste à dessécher le tube de sol par une de ses extrémités au moyen de silicagel.

Lorsqu'on essaie de remplir le tube avec du sable préalablement humecté, qui est de ce fait agrégé, on est obligé de tasser le sable pour rendre le remplissage régulier, mais ce faisant on exprime en partie l'eau des agrégats et on crée ainsi une distribution très irrégulière de l'eau. On pourrait alors remplir le tube en versant le sable dans l'eau, comme cela a été décrit dans la section 3. 11 de la 2e partie ; mais la solution saline de l'élément poreux rigide risque de se diluer par diffusion du sel dans l'eau du récipient, cette dilution affectant vraisemblablement plus la périphérie de l'élément que son centre ; la concentration en sel de la solution emplissant l'élément n'étant plus constante, le marquage perdrait toute signification.

Le dispositif expérimental a donc été modifié comme suit (fig. 4) : le contact entre le sable et l'élément rigide se fait par une face seulement de celui-ci ; des précautions particulières ont été prises pour éviter les pertes d'eau par évaporation à partir des autres faces de l'élément.

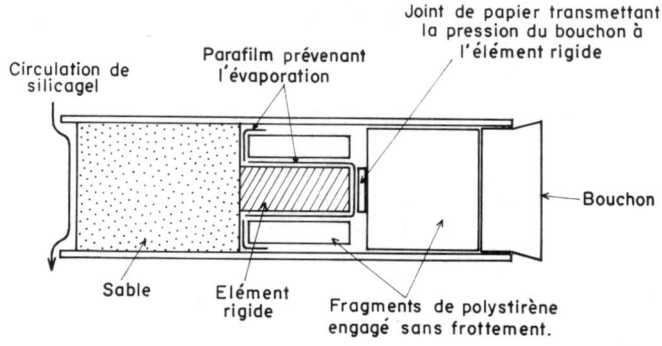



FIG. 4. — *Dispositif expérimental réalisé pour mettre en évidence la cession d'eau sous forme liquide d'un élément rigide au sable*

Les succions mises en jeu sont relativement faibles, puisque, au bout de 6 heures de ressuyage, la succion maximum appliquée à l'eau du sable au voisinage de l'élément grossier est de 50 cm d'eau seulement. Pour obtenir des succions plus élevées, la durée de l'expérience aurait dû être beaucoup plus longue, mais à ce moment-là, nous verrons que la diffusion du marqueur aurait considérablement compliqué l'interprétation des résultats.

Pour marquer l'eau, nous avons utilisé le $Cl_2Ca$, 2 $H_2O$ à une concentration de 1 p. 100, le calcium étant préféré au sodium, afin de ne pas provoquer la dispersion des colloïdes du sol. Le chlore a été dosé par potentiométrie, à l'aide de nitrate d'argent, sur la suspension obtenue en jetant la terre dans l'eau (Annexe 9).

Au cours de l'expérience trois tubes ont été utilisés :

— un tube témoin plein de terre humide ;
— un tube d'essai avec l'élément rigide ;
— un tube avec élément rigide pour évaluer la diffusion du marqueur en l'absence de mouvement de l'eau.

Les deux premiers tubes, dont le sable avait la même humidité pondérale (22,8 p. 100), ont été soumis à l'absorption par le silicagel pendant 6 heures.

Le dernier tube, identique au tube d'essai, a été bouché hermétiquement pour supprimer tout mouvement d'eau. La teneur en chlore dans le sable a été mesurée au bout de 6 heures également. La quantité de chlore qui se déplace par diffusion est proportionnelle à la surface de section à travers laquelle les ions diffusent, ici la fraction de la surface de section du sable occupée par l'eau, fraction plus grande que dans le tube d'essai, duquel on extrait de l'eau. De ce fait, les quantités de chlore qui ont diffusé dans le dernier tube constituent une limite supérieure des quantités qu'on aurait obtenues si on avait pu y réaliser les mêmes humidités que dans le tube d'essai, sans provoquer de mouvement en masse de l'eau.

2. 12. *Résultats.*

Une expérience a été réalisée avec un massif de billes de verre de diamètre compris entre 50 et 63 μ : la quantité d'eau cédée par les billes de verre a été quasi nulle. Il est vraisemblable que ce résultat est dû au fait que la succion de l'eau dans le massif est beaucoup trop élevée par rapport à la succion à laquelle était soumise l'eau du sable humide.

Une autre expérience a été réalisée en utilisant un prisme constitué de billes de plus grand diamètre (200-225 μ). Celui-ci a cédé 92,3 p. 100 de son eau et on a retrouvé du chlore jusqu'à l'extrémité de l'échantillon de sol, long de 4 cm dans cet essai ; la concentration en chlore s'élève brutalement au voisinage du silicagel (fig. 5), ce qui indique une perte d'eau par évaporation au voisinage du contact silicagel-sable.

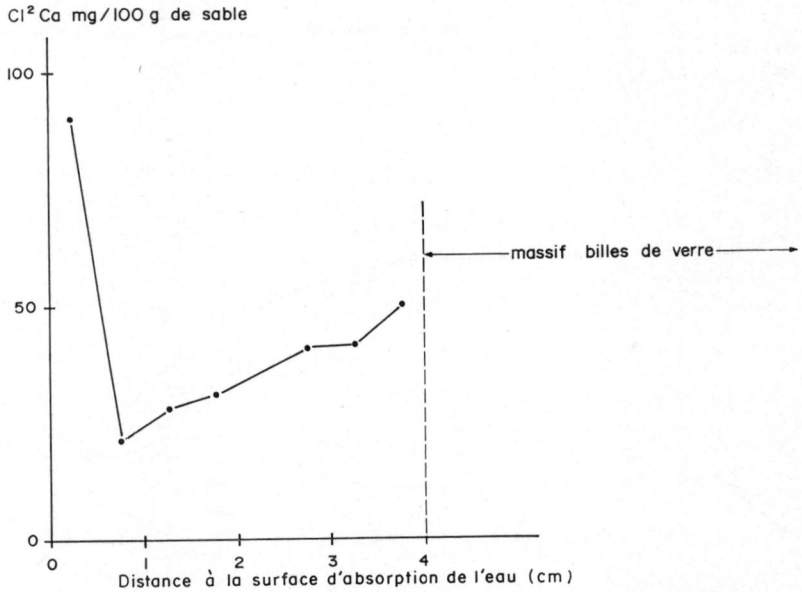



FIG. 5. — *Transfert d'eau sous forme liquide d'un massif de billes de verre au sable*
Teneur en chlore de la terre pour le tube d'essai, épaisseur de sable : 4 cm.

L'expérience a été recommencée en portant la longueur de l'échantillon de sable à 6 cm, de façon que l'eau salée provenant du massif de billes de verre ne parvienne pas jusqu'à extrémité du tube soumise à l'extraction d'eau ; on pouvait ainsi évaluer la longueur du trajet parcouru dans le sable par l'eau salée venue de l'élément rigide.

Ce sont les résultats de cette expérience qui sont représentés sur la figure 6. Le fait important est qu'on retrouve du chlore dans le sable jusqu'à 5,5 cm de la paroi du massif de billes de verre, distance de beaucoup supérieure à celle obtenue avec le témoin sans ressuyage : 2,5 cm, évaluation par excès de la distance parcourue par le chlore du seul fait de la diffusion. Ceci montre sans ambiguïté que le massif de billes de verre cède de l'eau sous forme liquide à un sable en cours de dessèchement, la perte d'eau du massif poreux étant de 92,4 p. 100 de sa teneur au début de l'expérience.

Les profils hydriques dans le sable sont assez semblables en l'absence ou en présence d'un massif de billes de verre, ce qui est à première vue assez surprenant.

Il est vraisemblable que la présence du massif de billes de verre modifie la dynamique du transfert d'eau du sable et que, dans ces conditions, la seule comparaison de profils hydriques à un même moment est insuffisante pour comprendre le processus mis en jeu.

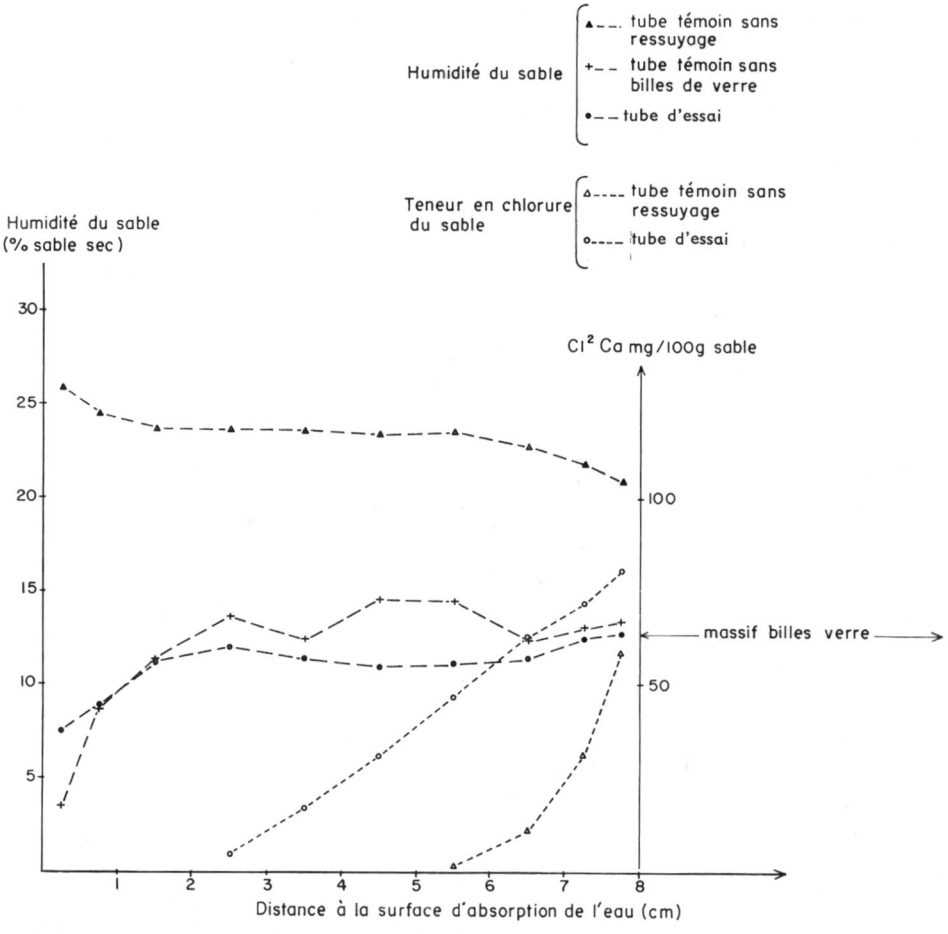



FIG. 6. — *Transfert d'eau sous forme liquide d'un massif de billes de verre au sable : profils hydriques et teneurs en chlore du tube d'essai et du tube témoin, épaisseur de sable : 8 cm.*

### 2. 2. — *Quantité d'eau transférée et nature des matériaux grossiers et de la terre*

Cette étude a été conduite sur quatre matériaux : craie, pierre ponce, verre mousse et brique, en utilisant deux sols : le sable de Fontenay et le sable de Fontainebleau, plus grossier que le précédent, décrits dans la section 5. 11. de la deuxième partie.

Les expériences ont été réalisées en ressuyant le sol à l'aide de pressions pneumatiques relativement basses : 3 000 g/cm² au maximum, et d'une pression élevée : 16 000 g/cm², dans un appareil à plaque ou à membrane (fig. 7). Comme, pour des raisons de résistances mécaniques, l'enceinte à haute pression est plus petite que l'enceinte à basse pression, on a utilisé des échantillons de dimensions différentes : des prismes à base carrée de dimensions 5 × 5 × 2 cm pour le ressuyage basse pression et des cylindres plats (diamètre : 28 mm, hauteur : 6 mm) pour le ressuyage haute pression. Comme les dimensions des éléments sont différentes, on ne peut comparer les résultats obtenus dans les expériences à basse et à haute pressions.

Nous n'avons pas utilisé de marqueur, car compte tenu de la durée des expériences (plusieurs jours), l'importance de la diffusion du marqueur aurait rendu les comparaisons avec le témoin quasi impossibles.

2. 21. *Les expériences à basse pression.*

Les échantillons préalablement humectés sous vide ont été disposés dans du sable saturé d'eau placé dans des cylindres reposant sur la plaque poreuse ; l'ensemble a été laissé dans l'eau pendant une nuit. Ensuite, on a ressuyé le sable jusqu'à obtention de l'équilibre, ce qui a demandé 30 jours.

2. 211. *Enrobage avec le sable de Fontenay.*

Les résultats sont exprimés en rapportant l'humidité après ressuyage à l'humidité au début de l'expérience. Ils sont présentés sur la figure 8 pour cinq pressions de ressuyage.

La craie ne cède de l'eau de façon appréciable qu'à une pression supérieure à 2 000 g/cm², et à 3 000 g/cm² il reste encore 88 p. 100 de l'eau existant initialement.

La brique ne cède pas d'eau aux faibles pressions, mais conserve seulement 10 p. 100 environ de son humidité initiale à 3 000 g/cm².

La pierre ponce commence à libérer de l'eau à des pressions supérieures à 100 g/cm².

Les différentes formes de courbe humidité-pression de ressuyage s'interprètent en comparant les succions exercées sur l'eau de l'élément grossier par ses propres pores et les pores du sable.

Le verre mousse cède presque 20 p. 100 de son eau initiale à une pression de 100 g/cm².

Les pores du sable n'exercent une succion qu'une fois qu'ils sont vides ; lorsqu'on augmente la pression appliquée, ce sont d'abord les gros pores du sable qui se vident, parce que l'eau y est moins fortement retenue, puis ceux qui sont un peu plus petits, et ainsi de suite. L'élément grossier cédera de l'eau lorsqu'elle y sera retenue par une succion inférieure à celle exercée par les pores du sable. Les courbes de répartition des rayons équivalents des pores des éléments grossiers (1) permettent de retrouver les principaux traits des courbes humidité-pression : la craie ayant des pores très fins ne cède de l'eau qu'à des pressions assez élevées ; la brique, qui a des pores plus larges que ceux de la craie, cède de l'eau plus facilement, mais comme le rayon minimum des pores est beaucoup plus grand que pour la craie, la quantité d'eau restant à la pression de 3 000 g/cm² est très faible ; les deux autres matériaux

(1) Fig. 4, de la première partie.

ont des courbes humidité-pression parallèles, comme le sont leurs courbes de répartition des diamètres équivalents ; on s'explique cependant mal la différence de comportement entre la pierre ponce et le verre mousse, alors que le rayon maximum des

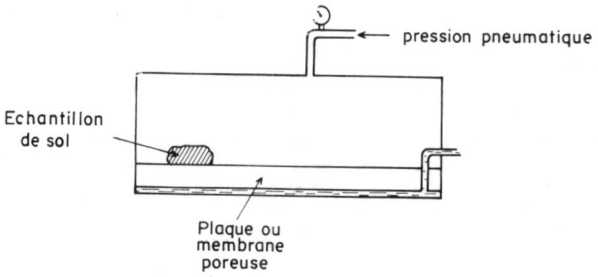



FIG. 7. — *Appareil à plaque ou à membrane*

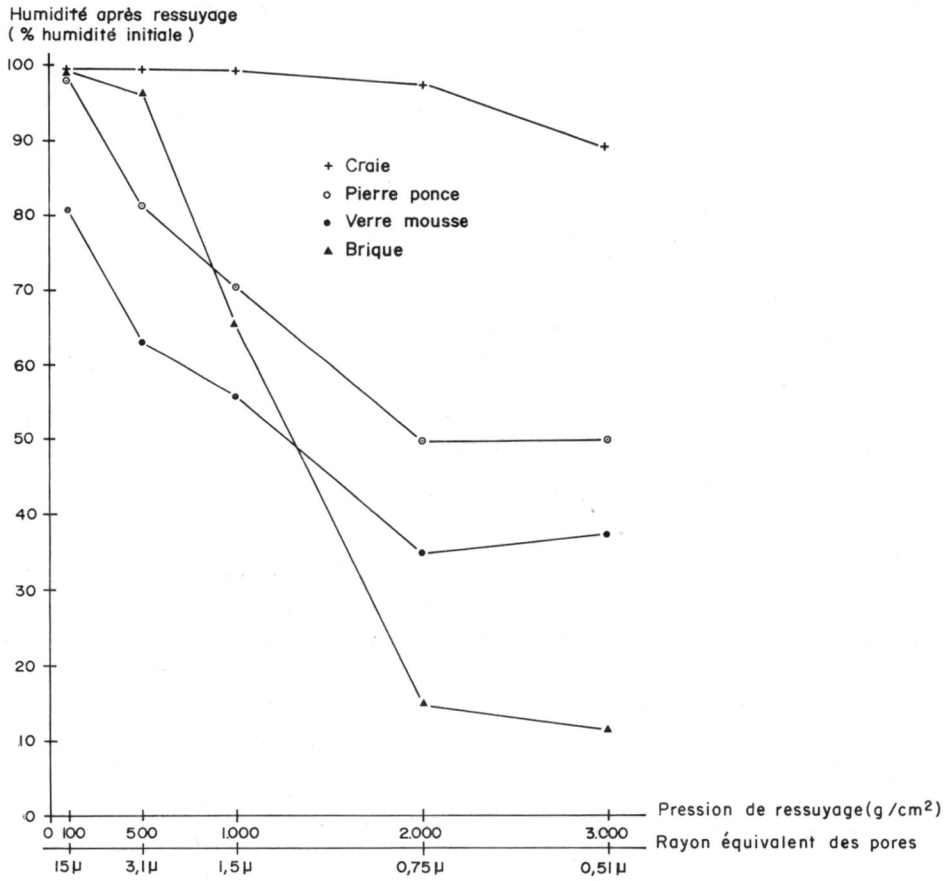



FIG. 8. — *Dessèchement d'éléments grossiers placés dans du sable humide ressuyé à des pressions différentes*

pores est du même ordre de grandeur ; cette différence tient probablement à ce que les pores plus petits mettant en communication les gros pores ont des diamètres différents dans les deux matériaux (cf. première partie).

2. 212. *Enrobage avec le sable de Fontainebleau.*

L'expérience a été réalisée à une seule pression : 3 000 g/cm².

La quantité d'eau cédée est nulle pour tous les échantillons, sauf la pierre ponce, de laquelle 11 p. 100 seulement de l'eau initiale a été extraite.

Il y a donc une influence très importante de la texture du matériau d'enrobage sur l'aptitude des éléments grossiers à lui céder de l'eau.

Globalement, on peut interpréter les différences entre les quantités d'eau cédées par le fait que le sable de Fontainebleau étant plus grossier que le sable de Fontenay, exerce, une fois desséché, une succion moins forte sur l'eau contenue dans l'élément grossier. Dans le cas de l'enrobage avec le sable de Fontainebleau, il reste cependant à expliquer que, quoique le verre mousse et la pierre ponce aient des dimensions maxima des pores du même ordre de grandeur, seule la pierre ponce cède de l'eau.

Le fait que, pour le sable de Fontainebleau, la perte d'eau des éléments poreux rigides soit quasi nulle renforce l'opinion selon laquelle il y a cession d'eau sous forme liquide des éléments au sable de Fontenay. Si la perte d'eau des éléments placés dans le sable de Fontenay provenait uniquement de l'évaporation, on conçoit difficilement que celle-ci ne se produise pas aussi dans le sable de Fontainebleau. En effet, compte tenu de sa granulométrie, les pores dans lesquels diffuserait la vapeur d'eau y sont plus larges que pour l'autre sable.

2. 22. *Les expériences à haute pression.*

Les matériaux grossiers préalablement façonnés en forme de cylindres plats ont été saturés d'eau sous vide, puis placés dans des anneaux contenant du sable saturé, comme l'indique la figure 9. Les anneaux étaient posés sur une membrane poreuse dans une enceinte où la pression pneumatique de 16 kg/cm² a été appliquée.

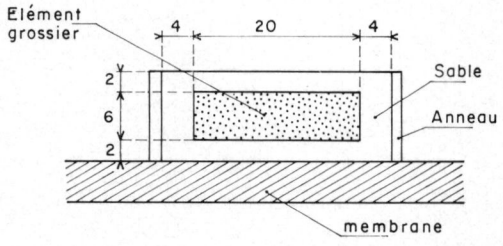



FIG. 9. — *Coupe du dispositif de ressuyage dans l'appareil à membrane*

Cette valeur de 16 kg/cm² a été retenue parce que, en ressuyant les sols saturés sous cette pression, on les amène à l'humidité correspondant approximativement au point de flétrissement.

Pour comparer l'effet de la nature de la terre, on a placé pour chaque matériau

grossier un fragment dans du sable de Fontenay et un autre dans du sable de Fontainebleau. Les ressuyages ont été réalisés au cours de la même expérience qui a duré 2 jours.

TABLEAU 2

*Humidité après ressuyage. P. 100 d'humidité à saturation*

| | Brique | Craie | Pierre ponce |
|---|---|---|---|
| Sable de Fontainebleau | 100 | 100 | 81,7 |
| Sable de Fontenay | 4,9 | 3,5 | 31,6 |

Les résultats du tableau 2 montrent une grande analogie avec ce qui a été obtenu pour les expériences à basse pression : les éléments grossiers perdent de l'eau lorsqu'ils sont enrobés dans le sable de Fontenay, alors que dans le sable de Fontainebleau, la perte est nulle.

### 2. 3. — *L'influence de la texture du matériau d'enrobage sur le transfert d'eau de l'élément grossier au sol*

Les expériences précédentes montrent que, pour un intervalle de dessiccation du sol correspondant à des succions extrêmes de 100 g/cm² et 16 000 g/cm², la texture du sol intervient sur la quantité d'eau cédée par les éléments grossiers, cette quantité étant nulle pour le sable à texture la plus grossière. Nous allons préciser cet effet de la texture du matériau d'enrobage au moyen de deux expériences.

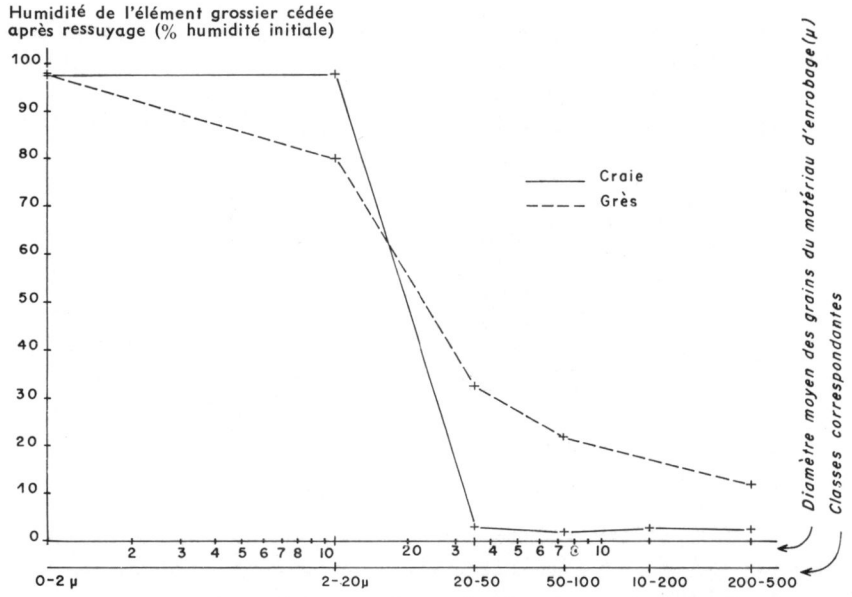



FIG. 10. — *Influence de la texture du matériau d'enrobage sur la cession d'eau*
Grès et craie. Ressuyage sous une pression de 16 kg/cm²

L'une d'elles consiste à ressuyer dans un appareil à membrane, sous 16 kg/cm² de pression, des fragments de craie placés dans trois terres différentes : un sable de Fontainebleau, un limon (16 p. 100 d'argile, 19 p. 100 de limon 2-20 μ) et une terre argileuse (46 p. 100 d'argile). Les quantités d'eau cédées par la craie sont nulles pour le sable de Fontainebleau, importantes et du même ordre de grandeur pour les autres terres (GRAS *et al.*, 1963).

L'autre expérience (GRAS *et al.*, 1962) a permis de mieux analyser l'effet de la dimension des particules de la terre. A cet effet, on a utilisé des matériaux meubles constitués de fractions extraites du sol : 0-2 μ, 2-20 μ, 20-50 μ, 50-100 μ, 100-200 μ et 200-500 μ. Les matériaux grossiers étaient de la craie et un grès, le ressuyage se faisait sous 16 kg/cm² de pression. Pour la craie, le transfert d'eau est négligeable lorsque le diamètre des particules est supérieur à 20 μ. Pour le grès, la quantité d'eau cédée diminue plus progressivement lorsque la taille moyenne des grains des fractions augmente (fig. 10). La cession d'eau d'un élément grossier à la terre dépend donc bien de sa texture.

Il est important de noter que le sable de Fontenay, auquel tous les éléments grossiers cèdent de l'eau, est pauvre en fractions fines : 0-2 μ = 5 p. 100, 2-20 μ = 0,9 p. 100, 20-50 μ = 1,1 p. 100. On peut donc penser que pour que les sols puissent recevoir de l'eau des éléments grossiers, il suffit qu'ils possèdent quelques éléments fins, ayant une force de succion suffisante.

## III. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA QUANTITÉ D'EAU EMMAGASINÉE PAR LE SOL

Dans la 2e partie, on a vu que, pour le calcul de l'humidité volumique d'un sol contenant des éléments grossiers inertes, on utilise la densité apparente partielle de terre fine ($d_{ap}$) ; la quantité d'eau exprimée en lame d'eau équivalente (mm), retenue dans une couche de sol d'épaisseur $h$ (dm) amenée à l'humidité $H_1$, est U (mm) = $d_{ap} \cdot h$ (dm) · $H_1$ (p. 100 de poids sec). Rappelons aussi que, lorsque les éléments grossiers absorbent de l'eau, U s'exprime de cette façon :

$$U = d_{ap} \cdot h \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h \cdot H_c,$$

$H_c$ étant l'humidité des éléments grossiers et $d_{cp}$ la densité apparente partielle de cailloux.

Évaluons la quantité d'eau disponible pour la végétation dans une épaisseur de sol $h$ exploitée par les racines des végétaux (1), le sol étant à la capacité au champ. Lorsque l'humidité du sol passe de la capacité au champ $H_1$ au point de flétrissement $H_2$, l'épaisseur $h$ de sol cède la quantité d'eau $d_{ap} \cdot h \cdot (H_1 - H_2)$. Les éléments grossiers cèdent à la plante par l'intermédiaire du sol une certaine quantité d'eau, lorsque ce dernier se dessèche de la capacité au champ au point de flétrissement. On ne peut parler de capacité au champ et de point de flétrissement pour les éléments grossiers, puisque la nature du sol intervient sur l'équilibre d'humidité qui s'établit entre l'élément grossier et le sol. On mesure donc l'humidité existant dans le caillou lorsqu'il y a équilibre hydrique entre lui et la terre amenée à la capacité

(1) On admet que les racines ne retirent pas directement l'eau des cailloux.

au champ, et de même l'humidité du caillou en équilibre d'humidité avec la terre au point de flétrissement. Ces deux humidités du caillou sont caractéristiques du couple caillou-matériau d'enrobage ; leur différence $H_{cu}$ est la contribution des cailloux à l'alimentation de la plante lorsque celle-ci dessèche la terre fine de la capacité au champ au point de flétrissement. On a donc :

$$U\ (mm) = (d_{ap} \cdot (H_1 - H_2) + d_{cp} \cdot H_{cu})\ h.$$

Nous allons maintenant donner quelques ordres de grandeur de la contribution des éléments grossiers à l'alimentation en eau des végétaux (GRAS *et al.*, 1963) :

— sol sablo-caillouteux des terrasses de la vallée du Rhône, épais de 50 cm, comprenant 43 p. 100 de cailloux en poids :

| | | | |
|---|---|---|---|
| terre fine | $d_{ap} = 1{,}0$ | $H_1 - H_2 =$ | 9 |
| cailloux | $d_{cp} = 0{,}7$ | $H_{cu} =$ | 8 |
| Contribution | terre fine : $1{,}0 \times 5 \times 9$ | = | 45 mm |
| | cailloux : $0{,}7 \times 5 \times 8$ | = | 28 mm |
| | Total | = | 73 mm |

— sol sableux sur schiste : les cailloux sont des fragments de schiste altéré, profondeur 70 cm.

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $d_{ap} = 1{,}1$ | $H_1 - H_2 =$ | 9,5 |
| | $d_{cp} = 1{,}0$ | $H_{cu} =$ | 4,2 |
| Contribution | terre fine : $1{,}1 \times 7 \times 9{,}5$ | = | 73 mm |
| | cailloux : $1{,}0 \times 7 \times 4{,}2$ | = | 29 mm |
| | Total | = | 102 mm |

— sol limoneux sur craie, épais de 40 cm

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $d_{ap} = 1{,}3$ | $H_1 - H_2 =$ | 13,3 |
| | $d_{cp} = 0{,}40$ | $H_{cu} =$ | 25,0 |
| Contribution | terre fine : $1{,}3 \times 4 \times 13{,}3$ | = | 69 mm |
| | cailloux : $0{,}4 \times 4 \times 25$ | = | 40 mm |
| | | = | 109 mm |

Dans ces deux derniers cas, on ne tient pas compte de l'eau fournie par la couche superficielle du substratum crayeux, ou de l'horizon de départ constitué de schiste altéré.

Il faut remarquer que l'eau des cailloux ne passe dans le sol que lorsqu'il est parvenu à un certain stade de dessèchement. Par exemple, la craie ne cède de l'eau au sable qu'une fois que celui-ci a été fortement desséché. Ceci a des conséquences différentes suivant les situations. En présence des seules précipitations, la craie contribue à l'alimentation en eau des plantes spontanées ou cultivées et constitue même un facteur de résistance à la sécheresse, puisque son eau est cédée progressivement. Par contre, dans le cas d'une agriculture intensive où l'on irrigue avant que le sol soit suffisamment sec pour extraire de l'eau de la craie, celle-ci se comportera comme un lest inerte.

## IV. — CONCLUSION

L'emploi d'un marqueur a permis de montrer qu'en conditions isothermes, l'eau passe sous forme liquide d'un élément rigide poreux au sable en voie de dessèchement. Il est vraisemblable que la plus grande partie des transferts d'eau des éléments grossiers à la terre se font sous cette forme en conditions naturelles. Ceci n'exclut pas le transfert en phase vapeur dans les conditions non isothermes.

Le transfert d'eau peut se décrire ainsi : lorsque le sol se dessèche, ses pores les plus larges se vident les premiers, le dessèchement affectant par la suite des pores de plus en plus fins. Lorsque les pores de la terre ainsi vidés ont un diamètre équivalent suffisamment petit pour exercer une succion supérieure à celle qui retient l'eau dans le corps rigide, cette dernière se déplace vers la terre.

Ceci met en évidence l'importance des diamètres des pores de la terre et de l'élément rigide. Si la terre a une texture trop grossière, le transfert d'eau est nul. La terre doit donc contenir une certaine quantité de matériaux fins pour que ce transfert soit possible ; dans ce dernier cas, plus les pores de l'élément grossier seront étroits, plus la terre devra être desséchée, de façon que ses pores fins se vident et puissent alors extraire de l'eau de l'élément.

La quantité d'eau cédée par l'élément grossier à la terre fine dépend du couple terre fine élément grossier.

## CONCLUSION GÉNÉRALE [1]

Un sable contenant des cailloux est un système hétérogène constitué de deux fractions, la terre fine et les cailloux ou éléments grossiers. Les propriétés hydriques d'un tel sol dépendent de la proportion des deux matériaux, de leurs propriétés et de leurs interrelations.

La porosité ouverte des éléments grossiers se remplit plus ou moins d'eau, même lorsqu'on opère avec précaution à la pression atmosphérique ; une fois l'équilibre atteint, la fraction de la porosité ouverte occupée par l'air est caractéristique de chaque matériau. Une régression positive existe entre la fraction de porosité ouverte occupée par l'air et le rayon maximum des pores pour l'ensemble des matériaux. Une étude des mécanismes d'emprisonnement d'air a révélé que le rayon maximum des pores n'intervient pas directement, mais en tant qu'indice de l'irrégularité de l'espace poral de chaque matériau, irrégularité favorisant l'emprisonnement d'air.

La dynamique de l'eau dans les cailloux poreux placés dans le sable concerne leur humectation par l'intermédiaire du sable et leur dessèchement au profit du sable.

Dans la phase d'humectation, une fois l'équilibre atteint, on constate que la fraction de la porosité ouverte des cailloux occupée par l'eau est très variable selon

[1] Pour les parties I, II et III.

leur nature. La plus ou moins grande propension des matériaux à l'emprisonnement d'air explique une partie de ces différences. Mais la plus grande partie de ces différences s'explique par les succions exercées sur l'eau par les pores du sable et par ceux de l'élément grossier, l'eau se déplaçant vers le milieu où la succion est la plus élevée : les matériaux étudiés ici dont la mouillabilité varie peu, se remplissent donc d'autant plus complètement aux dépens du sable que leurs pores sont plus étroits.

Le passage de l'eau sous forme liquide du caillou au sable est aussi sous la dépendance des succions exercées par le sable et l'élément grossier. Le transfert d'eau se produit chaque fois que se sont vidés des pores du sol suffisamment fins pour exercer sur l'eau de l'élément grossier une succion supérieure à celle qui l'y retient. La quantité d'eau ainsi cédée par l'élément n'est pas caractéristique de l'élément, mais du couple terre fine-élément grossier.

La présence au sein du sable d'un élément grossier modifie la cinétique du front humide qui se déplace dans le sable initialement sec. Les éléments grossiers poreux qui s'humectent au détriment du sable sont qualifiés d'actifs. Par contre, ceux qui n'absorbent pas d'eau parce que leurs succions sont insuffisantes ou qu'ils ne sont pas poreux sont appelés inactifs.

Examinons d'abord les modifications apportées à la cinétique du front humide lorsqu'il passe au niveau de l'élément. Les matériaux inactifs provoquent une augmentation de vitesse du front humide en réduisant le volume de sable à humecter. Les éléments actifs tendent d'une part à augmenter la vitesse du front humide comme ci-dessus, d'autre part à la diminuer en consommant de l'eau qui n'est plus disponible pour humecter le sable. Les valeurs relatives de ces effets de sens opposé déterminent le sens de la variation de vitesse, du moins dans les cas simples.

Une fois que le front humide est au-delà de l'élément, on constate deux types de changements : la vitesse du front humide diminue ou reprend la valeur qu'elle avait avant que le front ne soit parvenu à l'élément. On a l'un ou l'autre de ces comportements suivant le mode d'alimentation en eau du système.

Toutes les conclusions précédentes sont valables dans les cas où les éléments grossiers ne modifient pas la porosité du sable à leur voisinage. Les difficultés rencontrées pour réaliser cette condition dans nos expériences suggèrent que dans la nature les cailloux peuvent modifier les propriétés de la terre à leur voisinage.

*Reçu pour publication en novembre 1971.*

## REMERCIEMENTS

C'est à M. le Doyen MILLOT, directeur du Centre de Sédimentologie et de Géologie de surface du C. N. R. S., que je dois de pouvoir soutenir cette thèse à la Faculté des Sciences de Strasbourg. Il a bien voulu, malgré ses lourdes charges, présider le jury de ma thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

Je remercie M. le Professeur WEY de l'École supérieure de Chimie de Mulhouse qui a accepté d'examiner cette thèse.

Ce travail a été réalisé à l'Institut national de la Recherche agronomique. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à M. BUSTARRET, directeur général de cet organisme et à M. DROUINEAU, inspecteur général qui m'ont permis d'entreprendre ces recherches.

M. le Professeur HÉNIN, chef du Département d'Agronomie de l'I. N. R. A., a assuré ma formation tant dans le domaine scientifique que dans celui de la recherche, d'abord à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer, puis au Laboratoire des Sols où il m'a accueilli.

C'est lui qui est à l'origine de ce travail, qu'il a ensuite orienté et enrichi au cours de fréquents échanges de vue. Il a bien voulu accepter d'être le rapporteur de ma thèse. Je suis heureux de le remercier pour tout cela et pour ses précieux encouragements.

M. BÉTRÉMIEUX, directeur du Laboratoire des sols de l'I. N. R. A. m'a apporté son appui efficace pour la réalisation de cette recherche, qu'il en soit remercié.

Je tiens à remercier les enseignants de l'Institut de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg et en particulier M. DUNOYER de SEGONZAC qui m'a accueilli avec beaucoup de gentillesse et m'a aidé efficacement au cours des diverses étapes de la réalisation de ce travail.

Je n'aurai garde d'oublier mes collègues du Laboratoire des Sols pour leur aide directe ou indirecte. Je dois une mention toute particulière à L. TURC, dont la maîtrise de la physique et le jugement critique m'ont été particulièrement précieux.

J. OUDARD a dû mettre au point, puis réaliser une grande partie des nombreuses expériences. Il s'est acquitté de cette tâche avec beaucoup de conscience. Je tiens à le remercier tout particulièrement de sa contribution à cette recherche.

C'est avec plaisir que je remercie le Bureau de dessin et le Secrétariat qui ont contribué à une meilleure présentation de ce texte.

## SUMMARY

### EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

### III. — DYNAMICS OF WATER IN A FINE-EARTH/COARSE CONSTITUENTS SYSTEM

A previously moistened fine-earth/coarse-constituents system is subjected to desiccation.

When the coarse constituents are not porous, they merely alter the movements of water within the sand.

If the coarse constituents are porous, they yield water in liquid form to the sand when the latter has dried sufficiently so that the fine pores may be filled with water at the expense of the coarse constituents.

The amount of water thus transferred from the coarse constituents to the fine earth depends on the body force of the coarse-constituents/fine-earth system and on the moisture of the fine earth.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE BEWEGUNG DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENE WASSERS

### III. — DYNAMIK DES WASSERS IN EINER MISCHUNG VON FEINERDE UND GROBEN BESTANDTEILEN SCHWANKUNGEN BEI RÜCKGANG DER FEUCHTIGKEIT

Eine angefeuchtete Verbindung aus Feinerde und groben Bestandteilen wird der Austrocknung unterworfen.

Wenn die groben Bestandteile nicht porös sind, so beeinflussen die lediglich das Sichverschieben des Wassers in dem Sand.

Enthalten die groben Bestandteile aber Poren, so treten sie Wasserflüssigkeit an den Sand ab, wenn dieser so weith ausgetrocknet ist, dass die feinen Poren sich auf Kosten der groben Bestandteile mit Wasser aufüllen können.

Die Menge des so aus den groben Bestandteilen in die Feinerde übergehenden Wassers hängt von der Mischung der groben Bestandteile und der Feinerde sowie von dem Feuchtigkeitsgehalt der Feinerde ab.

## РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.
III. Динамика влаги в системе мелкая почва — крупные элементы.

Р. ГРА.

Предварительно увлажненная система мелкая почва — крупные элементы была подвержена сушке.

В тех случаях когда крупные элементы не пористы, они изменяют только передвижение влаги в песке.

В случаях пористости — они уступают влагу в форме жидкости, песку, когда этот последний достаточно сух, чтобы поры могли заполнятся водой за счет крупного элемента.

Количество влаги, переходящее таким образом от крупных элементов к мелкой почве, зависит от пары крупные элементы — мелкая почва, и от влажности мелкой почвы.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gras R., Monnier G., 1962. Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. *C. R. Acad. Sc.*, **254**, 3422-3424.

Gras R., Monnier G., 1963. Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux. *Sci. Sol*, 1, 13-20.

Hallaire M., Hénin S., 1958. Sur la non validité de l'équation de conductivité pour exprimer le mouvement de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sc.*, **246**, 1720-1722.

Puech J., 1966. Modalités de la dessiccation des sols par le gel de silice. *C. R. Acad. Sc.*, **263**, 645-648.

Puech J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

# ANNEXE I

## MESURE DE LA DENSITÉ RÉELLE

Elle nécessite la connaissance du poids d'un volume réel connu de matériau.

Le poids se mesure avec toute la précision désirable à l'aide d'une balance. La mesure du volume réel présente plus de difficultés ; elle peut se faire avec le pycnomètre à eau ou le pycnomètre à air.

Quelle que soit la méthode utilisée, il faut broyer finement l'échantillon, afin de ne pas compter comme volume de matériau, le volume de pores inaccessibles, qui peuvent éventuellement exister. Pour contrôler que les particules sont suffisamment fines, on vérifie qu'un broyage supplémentaire n'augmente pas la valeur de la densité ainsi mesurée.

### A. — *Mesure de la densité réelle avec le pycnomètre à eau*

Ce pycnomètre est un flacon qui se ferme avec un bouchon rodé surmonté d'un capillaire portant un trait de repère.

Connaissant les poids :

A = pycnomètre vide
B = pycnomètre + eau
C = pycnomètre + matériau
D = pycnomètre + matériau + eau

on a :

volume du pycnomètre = B — A
volume occupé par l'eau lorsque le pycnomètre contient le matériau = D — C
volume du matériau = (B — A) — (D — C)
poids de matériau = C — A

La densité réelle $d_r$ est donnée par

$$d_r = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

L'erreur maxima calculée en tenant compte uniquement des erreurs de pesée est très faible. En fait, cette erreur est souvent dépassée à cause de difficultés de réalisation, ou de précautions qui ne sont pas toujours prises.

L'emploi de pycnomètre en pyrex évite les variations de capacité du pycnomètre à la suite de variations importantes de température.

Il faut utiliser une eau qui soit à la même température pour mesurer le volume du pycnomètre, puis le volume du matériau. Sinon, on commet des erreurs appréciables. Il est commode d'ajuster la température de l'eau à une valeur proche de celle du milieu ambiant.

Une cause importante d'erreur provient du fait qu'au moment du remplissage du pycnomètre contenant le matériau, on risque d'emprisonner des bulles d'air. Pour limiter ce risque, on peut opérer de la façon suivante : le pycnomètre contenant le matériau broyé est placé dans une enceinte où l'on fait le vide pendant quelques heures. On remplit ensuite le pycnomètre sous vide dans l'enceinte avec de l'eau bouillie. Comme il peut rester encore quelques bulles d'air, on facilitera leur expulsion, en soumettant le pycnomètre à des variations de température de 10°C environ d'amplitude et en le mettant à nouveau dans une enceinte à vide pendant plusieurs heures.

Au moment de la pesée, les parois extérieures doivent être parfaitement sèches. Pour éviter la formation d'une bulle d'air on remplit souvent le pycnomètre de cette façon : le bouchon rodé est placé sur le corps du pycnomètre plein d'eau. Mais il se forme alors un ménisque à la partie supérieure du col rodé entre les parties mâle et femelle. Ce supplément de poids n'est pas constant d'une pesée à l'autre notamment puisque cette eau s'évapore (quantité évaporée de l'ordre de 10 mg en 1 minute) ; il affecte d'autre part différemment le numérateur et le dénominateur de l'expression de « $d_r$ ». Il faut donc soigneusement essuyer l'eau de ce ménisque ou, mieux, remplir le pycnomètre avec une seringue hypodermique dont on introduit l'aiguille dans le tube capillaire du col rodé.

La reproductibilité d'une mesure, distincte de la précision, traduit l'influence de phénomènes aléatoires et de la variabilité propre au matériau sur la valeur de la mesure. La vraie valeur a une certaine probabilité de se trouver dans l'intervalle $\bar{d}_r \pm ts$, $\bar{d}_r$ étant la moyenne des mesures, $s$ leur écart type et $t$ le coëfficient de Fisher. Par exemple, pour un matériau ayant une densité moyenne de 3,02 $ts = 0{,}059$ 100 $ts/\bar{d}_r = 1{,}9$ p. 100 — seuil 5 p. 100.

### B. — *Mesure de la densité réelle avec le pycnomètre à air à comparaison de volume*

Le principe consiste à mesurer le volume d'air occupé par l'échantillon, on est donc assuré que le fluide servant à la mesure pénètre bien dans les pores ouverts, ce qui n'est pas toujours le cas pour le pycnomètre à eau.

L'appareil (fig. A 1) comprend deux corps de pompe identiques, l'un $P_1$ dit de référence, l'autre $P_2$ dit de mesure destiné à recevoir l'échantillon de matériau. Ces corps de pompe peuvent être mis en communication avec l'atmosphère par un robinet R (position $R_1$), ou isolés l'un de l'autre et de l'atmosphère (position $R_2$). Un manomètre différentiel permet de vérifier l'identité des pressions dans les deux corps de pompe.

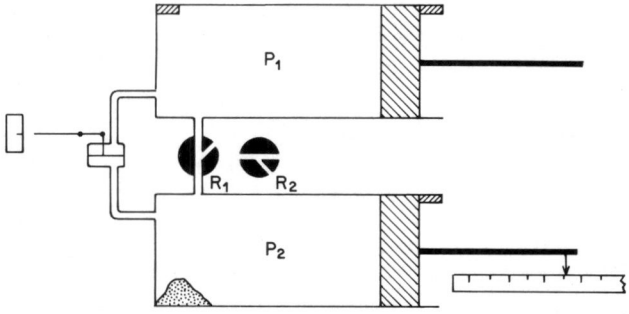



FIG. A 1. — *Schéma de principe d'un pycnomètre à air*

La mesure comprend deux opérations successives :

— les pistons étant tous deux contre leurs butées droites et le cylindre de mesure ne contenant pas d'échantillon, on laisse les cylindres s'emplir d'air à la pression atmosphérique (position $R_1$ du robinet). On met ensuite le robinet dans la position $R_2$. On déplace les pistons vers la gauche, en vérifiant que les pressions sont égales au moyen du manomètre différentiel. Lorsque le piston de $P_1$ est arrêté par la butée gauche, le piston de $P_2$ a une position à laquelle on attribue la valeur o (volume nul de l'échantillon).

— les pistons ayant été ramenés contre leurs butées droites, et l'échantillon étant placé dans le corps de pompe $P_2$, les deux cylindres sont emplis d'air à la pression atmosphérique. On supprime la communication entre $P_1$ et $P_2$ et on comprime l'air à la même pression dans les deux cylindres, jusqu'à ce que le piston de $P_1$ parvienne contre sa butée gauche. La position du piston de $P_2$ est repérée par un nombre $v$ proportionnel au volume réel de l'échantillon ;

La précision obtenue est d'abord reliée à l'étanchéité des pistons et des robinets et à la sensibilité du manomètre différentiel ; tout ceci dépend de la construction de l'appareil.

Les conditions définissant l'état de l'air doivent être identiques dans les deux corps de pompe : ceci implique qu'il n'y ait pas de différences entre les températures de l'air des deux cylindres, ni d'absorption d'eau par l'échantillon sur lequel on fait la mesure. Ceci implique que les parois des cylindres soient à la même température (se méfier des détentes intempestives de l'air dans un seul corps de pompe). Les mesures de volume réel de corps hygroscopiques ne sont pas possibles, sauf en prenant des précautions particulières.

Comme un calcul d'erreur n'aurait pas grand sens, nous donnons seulement la valeur de la reproductibilité. On a fait 7 mesures de densité réelle en réalisant chaque fois une prise différente sur un échantillon de craie broyée. Au seuil 5 p. 100, on a : $ts = 0{,}138$ 100 $ts/\bar{d}_r = 5{,}0$ p. 100. Cette erreur inclut la variabilité propre à la craie.

On a également vérifié pour un matériau, la craie, que les mesures obtenues au pycnomètre à eau et au pycnomètre à air étaient les mêmes.

La densité réelle s'obtient à partir d'un échantillon finement broyé. La densité pseudo-réelle n'existe que lorsqu'une fraction de la porosité ne communique pas avec l'extérieur : on utilise alors des fragments du matériau aussi grands que le permet l'enceinte de l'appareil.

## ANNEXE 2

### DÉPLACEMENT D'UN MÉNISQUE DANS UN CAPILLAIRE CYLINDRIQUE

#### A. — *Influence de l'inclinaison du capillaire sur la vitesse d'ascension du ménisque*

Un tube capillaire incliné de $\lambda$ sur l'horizontale affleure par son extrémité inférieure à un plan d'eau.

$r$ = rayon du capillaire
A = tension superficielle de l'eau
$x$ = abscisse du ménisque comptée positivement vers le haut sur l'axe du tube
$t$ = temps
$\Delta p$ = différence de pression entre le ménisque et le niveau de l'eau
$n$ = viscosité

La loi de Poiseuille s'écrit :

$$dx/dt = (r^2/8n)\ (\Delta p/x)$$

$\Delta p = (2\ A/r - x \sin \lambda)$, en prenant 1 pour masse volumique de l'eau.

$$dx/dt = (r^2/8n) \quad \left(\frac{2\ A/r - x \sin \lambda}{x}\right)$$

$$dx/dt = (r^2/8n) \quad \left(\frac{2\ A/r}{x} - \sin \lambda\right)$$

La vitesse diminue lorsque sin $\lambda$ croît de 0 à 1, c'est-à-dire lorsque le tube passe de l'horizontale à la verticale.

$$\text{Pour } \lambda = \pi/2, \text{ tube vertical, } dx/dt = (r^2/8n)\left(\frac{2\ A/r}{x} - 1\right)$$

$$\lambda = 0, \text{ tube horizontal } dx/dt = (r^2/8n)\ \frac{2\ A/r}{x}$$

Pour le tube horizontal la vitesse s'annule à l'infini ; lorsque le tube est incliné la vitesse s'annule lorsque le ménisque atteint la hauteur d'ascension capillaire : $x \sin \lambda = 2\ A/r$, c'est-à-dire lorsque les forces de tension superficielle sont égales au poids de la colonne d'eau.

En intégrant les équations différentielles précédentes on obtient la formule donnant $x$ en fonction de $t$. Pour

$$0 < \lambda < \pi/2, \ dx/dt = (r^2/8n)\left(\frac{l \sin \lambda - x \sin \lambda}{x}\right)$$

en exprimant que la hauteur d'ascension capillaire maxima H est telle que $H = 2\ A/r = l \sin \lambda$.

$$dx/dt = (r^2 \sin \lambda/8n)\ \frac{(l - x)}{x}\ \frac{x\ dx}{(l - x)} = (r^2 \sin \lambda/8n)dt$$

Comme :

$$\frac{x}{l - x} = \frac{x - l + l}{l - x} = \frac{-(l - x) + l}{l - x} = -1 + l/(l - x)$$

$$-dx + \frac{l\ dx}{(l - x)} = (r^2/8n)dt$$

$-x + l \text{ Log } (l - x) = (r^2/8n)(t + C)$. En écrivant que pour $t = 0$ $x = 0$, $l \text{ Log } l = (r^2/8n)C$.

Tout calcul fait :

$$x + l \operatorname{Log} (l - x/l) = - (r^2 \sin \lambda/8n)t.$$

On a fait les calculs avec $r = 0{,}01$ cm, $A = 75$ dyne/cm,
$n = 0{,}01$ pour des valeurs de $\lambda$ de $45^0$ et $90^0$.

L'abscisse du ménisque dans le tube horizontal est donnée par l'intégration de :

$$dx/dt = (r^2/8n) \frac{2A/r}{x} \qquad x = ((Ar/2n)t)^{\frac{1}{2}}$$

B. — *Influence du rayon d'un capillaire vertical sur la vitesse d'ascension du ménisque*

Comme les formules précédentes sont trop compliquées pour permettre une discussion algébrique, on a construit les courbes $x - t$ pour un capillaire de rayon 0,01 cm et pour un autre de rayon 0,02 cm. Les ménisques passent au même moment à la cote $x_1$. Dans l'intervalle $0 - x_1$, le ménisque dans le capillaire large est toujours plus élevé que dans le capillaire étroit.

## ANNEXE 3

### CORRECTION DE FILTRE COMPLEXE

La formule du filtre complexe [1] donne $D = \dfrac{S\,(h + l')}{l_1/K_1 + l'/K'}$. En négligeant l'épaisseur de sable grossier l'on obtient : $D = K_{1S} Sh/l$ qui donne $K_{1S} = Dl/Sh$.

Faisons apparaître dans l'expression du filtre complexe le groupement $Dl/Sh$ :

$$D = \frac{S\,(h + l')}{l/K_1 + l'/K'} = \frac{S\,h(1 + l'/h)}{(l/K_1)\,(1 + (K_1/K')\,(l'/l))}$$

$$K_1 = (Dl/Sh) \frac{1 + (K_1/K')\,(l'/l)}{1 + (l'/h)}.$$

Or $Dl/Sh = K_{1S}$

$$K_1 = K_{1S} \frac{1 + (K_1/K')\,(l'/l)}{1 + (l'/h)}$$

$(K_1/K')\,(l'/l)$ et $(l'/h)$ apparaissent comme termes correctifs.

Dans le terme correctif $(K_1/K')\,(l'/l)$ assimilons $K_1$ à $K_{1S}$, ce qui n'entraîne qu'une faible variation de la valeur de ce terme déjà petit :

$$K_1 = K_{1S} \frac{1 + (K_{1S}/K')\,(l'/l)}{1 + (l'/h)} = K_{1S} \frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon'}$$

Pour les tubes longs ($l = 48$ cm)

$$\varepsilon = (0{,}07/15)\,(2/48) = 1{,}9 \cdot 10^{-4}$$
$$\varepsilon' = (2/49) = 4 \cdot 10^{-2}$$
$$(1 + \varepsilon)/(1 + \varepsilon') = 0{,}961$$
$$K_1 = 0{,}96\ K_{1S} \qquad K_1/K_{1S} = 0{,}96 \qquad 1 - K_1/K_{1S} = 1 - 0{,}96$$
$$(K_{1S} - K_1)/K_{1S} = 0{,}04$$

$\Delta K/K = 0{,}04$, erreur de l'ordre de grandeur de la précision sur K.

Pour les tubes courts ($l = 20$ cm)

$$\varepsilon = (0{,}07/15)\,(3/20) = 7.10^{-3}$$
$$\varepsilon' = 3/21 = 0{,}15$$
$$(1 + \varepsilon)\,(1 + \varepsilon') = 0{,}87$$

$\Delta K/K = 0{,}13$ ; le fait de négliger que le tube soit complexe introduit une erreur considérable.

Pour les mesures de perméabilité, traiter le filtre comme s'il était simple surestime de façon appréciable la valeur de la perméabilité mesurée, lorsque le rapport épaisseur de sable grossier/épaisseur de terre dont la perméabilité est à mesurer est trop grand.

[1] Figure 3, deuxième partie.

## ANNEXE 4

### PRÉCISION SUR LA MESURE DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ K

*L'erreur relative maxima* sur un produit F de facteurs est la somme des erreurs sur les différents facteurs de l'expression. Lorsque l'expression F est compliquée, il est commode d'en prendre la différentielle logarithmique dlog F = dF/F, en transformant les signes — en signe +. Ceci revient à se placer dans le cas le plus défavorable où toutes les erreurs jouent dans le même sens, par exemple par excès.

Lorsque le nombre des termes d'une expression augmente, il est de moins en moins probable que les erreurs sur tous les termes soient dans le même sens. *L'erreur relative moyenne* est ainsi surestimée.

On pallie en partie cet inconvénient en prenant comme évaluation de dF/F la racine carrée de la somme des carrés des erreurs relatives sur chaque terme.

Nous ne nous sommes pas livrés à ce calcul. Les erreurs calculées seront donc des erreurs maxima qui ont une probabilité minime d'être dépassées, et non des erreurs moyennes.

$$K = Dl/Sh \qquad \log K = \log D + \log l - \log S - \log h$$
$$\Delta \log K = \Delta K/K = \Delta D/D + \Delta l/l + \Delta S/S + \Delta h/h$$
$$D = Q/t \qquad \Delta D/D = \Delta Q/Q + \Delta t/t$$
$$Q = 100 \text{ ml} \qquad Q = 0{,}1 \text{ ml} \qquad \Delta Q/Q = 0{,}001$$
$$t = 3\,600 \text{ s.} \qquad t = 1 \text{ s.} \qquad \Delta t/t = 0{,}000\,2$$
$$\Delta D/D = 0{,}001$$
$$S = (\pi/4)\, a^2 \quad (a = \text{diamètre})$$
$$\Delta S = (\pi/2)\, a \cdot \Delta a$$
$$\Delta S/S = 2\, \Delta a/a$$

$a = 5{,}4$ cm $\Delta a = 0{,}05$ cm (mesure au pied à coulisse) $\Delta S/S = 0{,}018$

L'erreur sur la longueur étant de 0,1 cm $\Delta h = \Delta l = 0{,}1$

Pour les tubes courts $h = 21$ $l = 20$

$$\Delta h/h = 0{,}004$$
$$\Delta l/l = 0{,}005$$

Pour les tubes longs $h = 49$ $l = 48$

$$\Delta h/h = 0{,}002$$
$$\Delta l/l = 0{,}002$$

$\Delta K/K = 2{,}8$ p. 100 pour les tubes courts.
$\Delta K/K = 2{,}3$ p. 100 pour les tubes longs.

## ANNEXE 5

### PRÉCISION SUR LE CALCUL DU RAPPORT $(D_1/D_2)_c$ DANS LES EXPÉRIENCES AVEC LES ÉLÉMENTS NON POREUX

(cylindres de matériaux non poreux de grand diamètre)

$$(D/D_2)c = \frac{S(l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S)}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$\log (D/D_2)c = \log S + \log [l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S] - \log (l_1 + l_2 + l_3)$$

$$\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = \Delta S/S + \Delta \frac{(l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S}{l_1/S + l_2/(S - u) + l_3 S} + \frac{\Delta(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$\Delta\,(l_1/S) = \Delta\,l_1/S + (\Delta\,S/S^2)l_1$$

$$\Delta\,(l_2/(S-u)) = \Delta\,l_2/(S-u) + \frac{(\Delta\,S + \Delta\,u)l_2}{(S-u)^2}$$

$$\Delta\,(l_3/S) = \Delta\,l_3/S + (\Delta S/S^2)l_3$$

$$\frac{\Delta\,(l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S} = \frac{(\Delta l_1 + \Delta l_3)/S + (l_1 + l_3)\,(\Delta S/S^2) + \Delta l_2(S-u) + l_2(\Delta S + \Delta u)/(S-u)}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S}$$

$$\frac{\Delta\,(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3} = \frac{\Delta\,l_1 + \Delta\,l_2 + \Delta\,l_3}{l_1 + l_2 + l_3}$$

d'après l'annexe 1 $\Delta\,S/S = 0{,}018\,0$

$l_2 = 11$ cm

tubes courts $l_1 + l_2 + l_3 = 20$ cm $l_1 + l_3 = 9$ cm

tubes longs $= 48$ cm $= 37$ cm

$S = 21$ cm² $u = 12{,}5$ cm² $S - u = 8{,}5$ cm²

$S = \pi\,a^2/4$ ($a$ = diamètre) $\Delta S = (\pi/2)\;a \cdot \Delta a$

$a = 5{,}4$ cm $\Delta a = 0{,}05$ cm

$\Delta S = 0{,}4$ cm²

$\Delta\,u = (\pi/2)\;a \cdot \Delta a$

$a = 4$ cm $\Delta\;a = 0{,}05$

$\Delta\;u = 0{,}3$ cm²

$\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = 0{,}1$ cm

la valeur de l'expression centrale est $0{,}010\,0$

$3\,\Delta l/(l_1 + l_2 + l_3) = 0{,}015\,0$

pour les tubes courts $\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = 4{,}3$ p. 100

pour les tubes longs $= 3{,}5$ p. 100

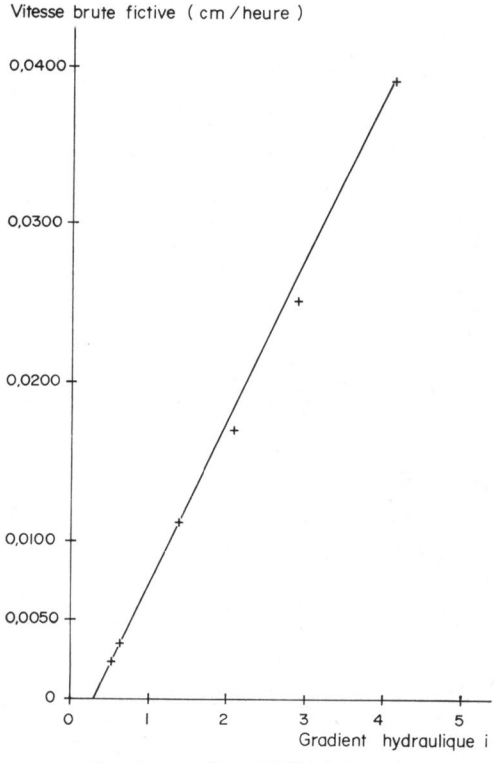



FIG. A 2. — *Perméabilité de la craie*

## ANNEXE 6

### FILTRATION DE L'EAU DANS LA CRAIE

La loi de Darcy $D = KS\ h/l$ peut s'écrire $D/S = Kh/l$,

ou en posant $D/S = V$ : vitesse brute fictive

$h/l = i$ : gradient hydraulique

$V = Ki$

La droite représentative de $V = Ki$ passe par l'origine.

Pour la craie les points expérimentaux se placent sur une droite qui ne passe pas par l'origine (fig. A 2), c'est-à-dire que la circulation de l'eau ne commence que lorsque $i$ dépasse la valeur $i_0$ :

$$V = K\ (i - i_0).$$

donc K varie avec le gradient hydraulique.

## ANNEXE 7

### PRÉCISION SUR LE CALCUL DU RAPPORT $(D_1/D_2)_c$ DANS LES EXPÉRIENCES AVEC LES ÉLÉMENTS POREUX

(cylindres poreux de grand diamètre et tubes longs)

$$(D_1/D_2)_c = (l_1 + l_2 + l_3)^{-1} \cdot \left(l_1 + l_3 + \frac{l_2 K_1 S}{K_1(S - u) + K_2 u}\right)$$

$$\log (D_1/D_2)_c = -\log (l_1 + l_2 + l_3) + \log \left(l_1 + l_3 + \frac{l_2 K_1 S}{K_1(S - u) + K_2 u}\right)$$

$$\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3}{l_1 + l_2 + l_3} + \frac{\Delta l_1 + l_3 + l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)}{l_1 + l_3 + l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)}$$

$$\Delta(l_1 + l_3 + l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)) = \Delta l_1 + \Delta l_3 + \Delta l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$
$$+ \Delta K_1 \cdot l_2 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$
$$+ \Delta S \cdot l_2 K_1/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$

$$+ l_2 \cdot K_1 S \frac{(\Delta K_1 \cdot (S - u) + (\Delta S + \Delta u) K_1 + \Delta K_2 \cdot u + \Delta u \cdot K_2)}{(K_1 (S - u) + K_2 u)^2} =$$

$$\Delta l_1 + \Delta l_3 + (\Delta l_2 \cdot K_1 S + \Delta K_1 \cdot l_2 S + \Delta S \cdot l_2 K_1)/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$

$$+ \frac{l_2 K_1 S (\Delta K_1 \cdot (S - u) + (\Delta S + \Delta u) K_1 + \Delta K_2 \cdot u + \Delta u \cdot K_2)}{(K_1 (S - u) + K_2 u)^2}.$$

Erreur sur le 1er terme : $= 3\ \Delta l/(l_1 + l_2 + l_3) = 0{,}006$

En admettant pour $K_2$ une précision de 10 p. 100, comme $K_2 = 0{,}000\ 3$ $\Delta K_2 = 0{,}000\ 03$

Erreur sur 2e terme : $= 0{,}095$

$$\Delta(D_1/D_2) / (D_1/D_2) = 11 \text{ p. } 100$$

Cette valeur est certainement supérieure à la réalité puisque, il est vraisemblable que certaines erreurs de sens inverse se compensent, le calcul de $(D_1/D_2)$ nécessitant 7 paramètres.

# ANNEXE 8

## INFILTRATION DE L'EAU DANS LA CRAIE

Si l'on maintient une lame d'eau d'épaisseur constante « *a* » au-dessus d'un échantillon de craie sèche de section « S », il se forme un front humide qui se déplace vers le bas (fig. A 3).

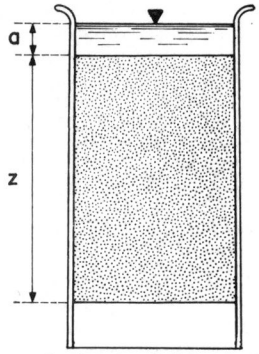



FIG. A 3. — *Infiltration de l'eau dans la craie*

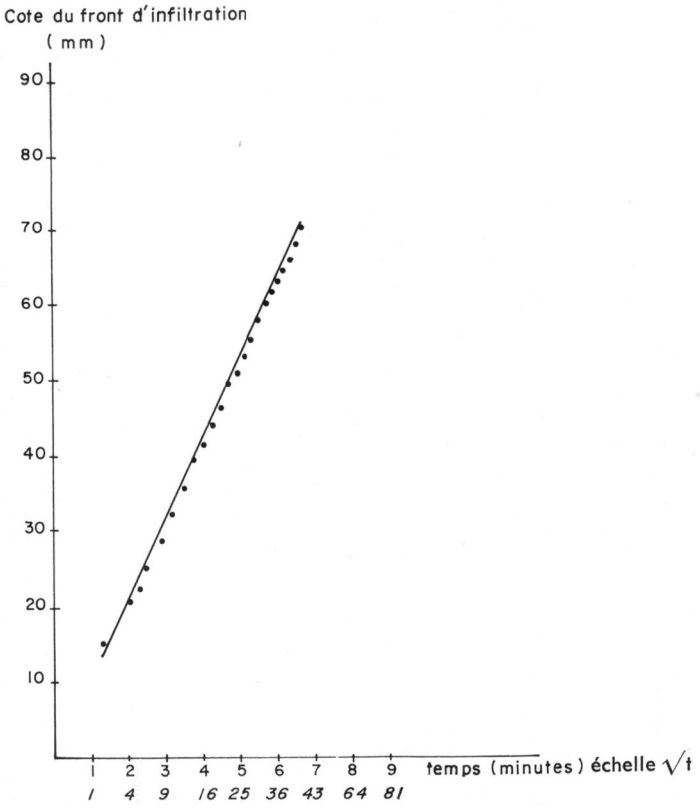



FIG. A 4. — *Infiltration de l'eau dans la craie. Cote du front humide et temps*

Le débit instantané $D_z$ au moment où le front humide est à la cote $z$ est

$D_z = KS\left(\frac{a + z + \psi}{z}\right)$, K étant la perméabilité de la craie.

En prenant comme valeur de $a$ : 1 cm, de $z$ : 100 cm, la valeur de $\psi$ étant 2 200 cm, $(a + z)$ est petit devant $\psi$. On peut donc en première approximation négliger $a + z$.

Écrivons $D_z$ de façon à faire apparaître l'erreur commise en négligeant $a + z$ devant $\psi$ :

$$D_z = KS\frac{\psi}{z}\left(1 + \frac{(a + z)}{\psi}\right)$$

Comme $(a + z) / \psi = 101/2\,200 = 4{,}5$ p. 100 $= \varepsilon$

$$D_z = KS\frac{\psi}{z}(1 + \varepsilon) \cdot \not\equiv KS\frac{\psi}{z}$$

Si on considère le déplacement du front humide on a :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{100\ K}{P}\frac{\psi}{z} \qquad z \cdot dz = \frac{100\ K}{P}dt$$

$$z^2 = (200\ K/P)\ t$$

$$D = \frac{dQ}{dt} = KS\frac{\psi}{z} = \frac{KS\ \psi}{\sqrt{\frac{200\ K}{P}}\sqrt{t}} \qquad Q = \frac{KS\ \psi}{\sqrt{\frac{200\ K}{P}}}\sqrt{t}$$

Ces expressions sont identiques à celles obtenues dans le cas de la circulation horizontale, ce qui est normal, puisque le seul effet pris en compte est celui de la succion.

Les points expérimentaux représentant la cote $z$ et $\sqrt{t}$ s'ordonnent autour d'une droite (fig. A 4), ce qui confirme bien la validité de l'approximation effectuée. Signalons que cette dernière est d'autant meilleure que la profondeur humectée est plus faible : pour $z = 10$ cm, $\varepsilon = 0{,}45$ p. 100.

## ANNEXE 9

### DOSAGE DU CHLORE PAR POTENTIOMÉTRIE AVEC LE NITRATE D'ARGENT

Le chlore est dosé par le nitrate d'argent suivant la réaction :

$$Ag^+ + Cl^- \leftrightharpoons ClAg \downarrow$$

On aurait pu extraire le chlorure de calcium du sable par lessivage à l'eau et déterminer le point équivalent (qui correspond au moment où l'on a mis en présence de $Cl^-$ la quantité théoriquement nécessaire de $Ag^+$), avec le chromate de potassium comme indicateur. Mais le liquide d'extraction est coloré, ce qui enlève toute précision à la méthode. Ceci nous a conduit à fixer le point équivalent par potentiométrie. Cette méthode présente, en outre, l'avantage de supprimer l'extraction préalable du chlorure par lessivage, le dosage s'effectuant directement sur la suspension.

Le potentiel d'une électrode parcourue par un courant d'intensité connue (qui peut être nulle) est fonction de la concentration du corps susceptible d'échanger des électrons :

$$Ag^+ + Cl^- - e \leftrightharpoons AgCl \downarrow$$
$$E = E_o - 0{,}058 \log (Cl^-) ;$$

$(Cl^-)$ étant l'activité du chlore.

Le dispositif de mesure comprend donc une électrode inattaquable, dite électrode indicatrice, dont le rôle est uniquement de céder ou d'accepter des électrons. C'est une électrode Ag/ClAg, qui est constituée d'un fil d'argent plongée dans la solution à doser ; on admet que, dès le début du dosage, l'électrode d'argent se recouvre de chlorure d'argent. Le potentiel de cette électrode est mesuré par rapport à celui d'une électrode dont le potentiel reste constant : l'électrode de référence, dans notre cas une électrode au sulfate mercureux (mercure/$Hg_2SO_4$/$K_2SO_4$ saturé).

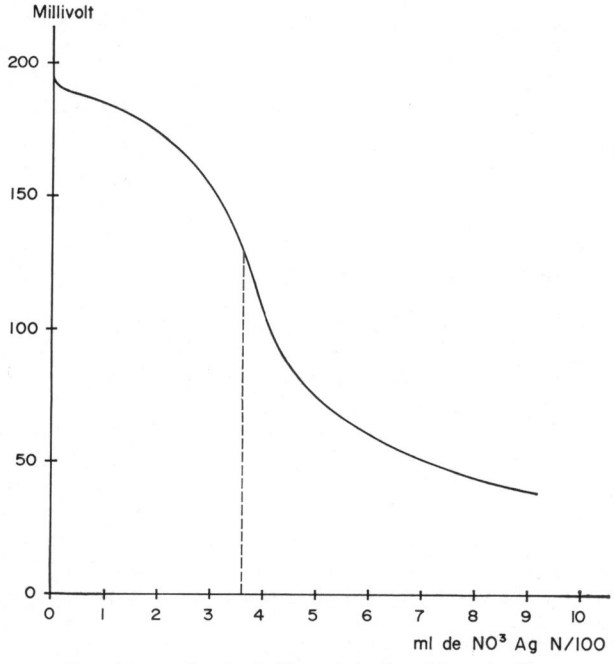



FIG. A 5. — *Courbe de titrage potentiométrique du chlore*

Au moment où la précipitation des chlorures par le nitrate d'argent est complète, il y a une saute de potentiel indiquant le point équivalent. En fait, on a une courbe d'allure sigmoïdale $E = f(cm^3\ AgNO^3)$ (fig. A 5). Le point équivalent est indiqué par un point singulier de cette courbe, ici le point d'inflexion.

Pour éviter que la phase solide ne perturbe l'homogénéité de la phase liquide de suspension, on ne met pas plus de 20 g de sol dans 100 ml d'eau. La suspension est maintenue homogène par un agitateur magnétique pendant le dosage.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 407-417.

# UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PAR UNE CULTURE DE *VIGNA SINENSIS*

## I. — Étude théorique de l'influence de l'héliotropisme des feuilles sur l'interception des rayonnements

C. VARLET GRANCHER et R. BONHOMME

*Station de Bioclimatologie,*
*Centre de Recherches agronomiques des Antilles et de la Guyane, I. N. R. A.,*
*Petit-Bourg (Guadeloupe)*

RÉSUMÉ

L'étude de l'héliotropisme d'une culture de *Vigna sinensis* est abordée dans un premier temps en comparant l'interception du rayonnement solaire par cette culture et par des cultures dont les feuilles auraient une inclinaison constante (fig. 6 et 8 pour deux indices foliaires différents).

Il en ressort que l'héliotropisme favorise une captation très forte d'énergie solaire dans les premières heures de la matinée à un moment où la photosynthèse est généralement considérée comme très active. En revanche, l'énergie solaire captée est faible aux heures chaudes de la journée limitant de ce fait l'élévation de la température associée aux trop fortes conditions d'évapotranspiration.

## I. — INTRODUCTION

Une culture de *Vigna* présente, particulièrement dans les premiers stades de son développement, des phénomènes d'orientation des feuilles par rapport à la direction des rayons solaires. La géométrie de cette végétation (inclinaison et azimut des feuilles) varie donc au cours de la journée. Nous avons essayé d'estimer l'influence de ce phototropisme sur la quantité d'énergie solaire interceptée à deux stades du développement de la culture.

## II. — MÉTHODES ET TECHNIQUES

Le couvert végétal étudié est une culture de *Vigna sinensis* V 53, semée à raison de 35 plantes par m². L'indice foliaire $f$ (surface de feuilles par unité de surface de sol) est calculé à partir d'une corrélation entre le produit de la longueur par la largeur ($L \times l$) et la surface de chaque feuille.

A partir des mesures de surfaces foliaires et de géométrie de la culture, nous calculons l'énergie solaire interceptée et nous comparons les valeurs obtenues à celles de modèles simples ayant même indice foliaire.

FIG. 1. — Vigna sinensis *au stade « deux feuilles primitives »*

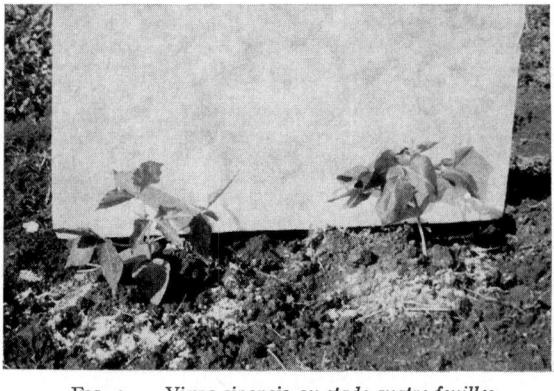


FIG. 2. — Vigna sinensis *au stade quatre feuilles*

La géométrie du couvert végétal est caractérisée à un instant donné par la mesure de la fréquence des feuilles faisant un angle $\varphi$ entre les rayons solaires directs et la normale au plan de chaque feuille (méthode de SHIMAN, 1967).

Les mesures ont été effectuées à deux stades :

— stade deux « feuilles primitives » : celles-ci sont simples (de forme triangulaire), opposées et orientées préférentiellement selon un axe est-ouest (fig. 1) ;
— stade quatre feuilles : la plante présente en plus quatre feuilles composées de 3 folioles (fig. 2).

## III. — INFLUENCE DE L'HÉLIOTROPISME DES DEUX FEUILLES PRIMITIVES SUR L'INTERCEPTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'indice foliaire $f$ à ce stade de développement est suffisamment faible ($f = 0{,}08$) pour qu'il n'y ait pas d'ombre portée d'une plante sur l'autre.

### 3. 1. — *Modèle de couvert végétal à deux feuilles simples, dont l'inclinaison est constante*

Nous supposons que :

— la plante a deux feuilles simples, opposées, ayant même inclinaison sur le plan horizontal ($i$),
— les deux feuilles considérées sont triangulaires et jointes par leur base,
— le plan vertical passant par le grand axe de l'ensemble des deux feuilles (fig. 3) passe aussi par le soleil ; celui ci est au zénith à midi en zone tropicale.

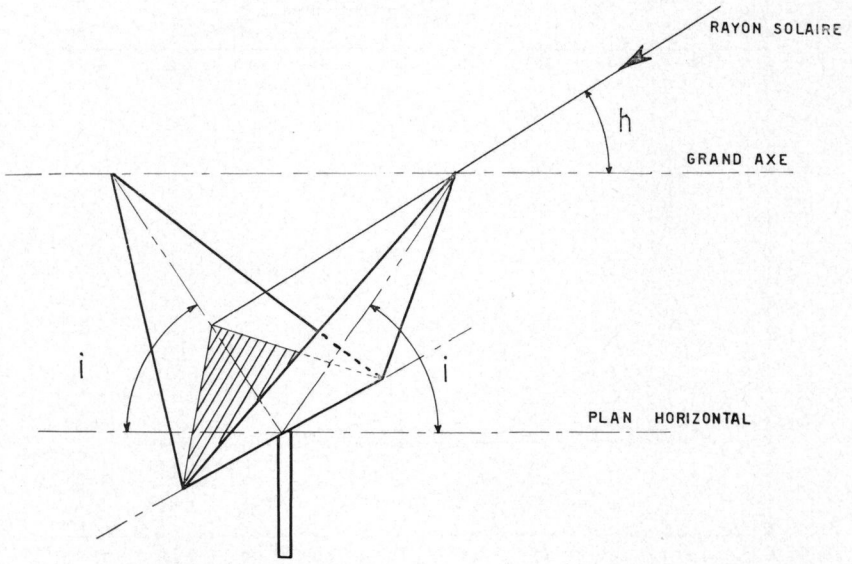



FIG. 3. — *Modèle de couvert végétal à deux feuilles simples dont l'inclinaison est constante*

Compte tenu de l'ombre portée par une feuille sur l'autre, il est alors possible de calculer pour une plante, la surface ombrée par l'ensemble des deux feuilles selon la hauteur du soleil. Pour le couvert végétal, nous caractérisons l'interception du rayonnement solaire direct par la surface totale ombrée par unité de surface de sol, qui représente le pourcentage d'énergie solaire directe captée : A.

### 3. 2. — *Mesure de la part d'énergie solaire directe captée par la culture de* Vigna

Les mesures de S (surface d'une feuille en $m^2$) et de l'angle $\varphi$ (angle que font les rayons solaires directs avec la normale à une feuille donnée) permettent, pour une hauteur de soleil $h$, de calculer la surface ombrée sur un plan perpendiculaire aux

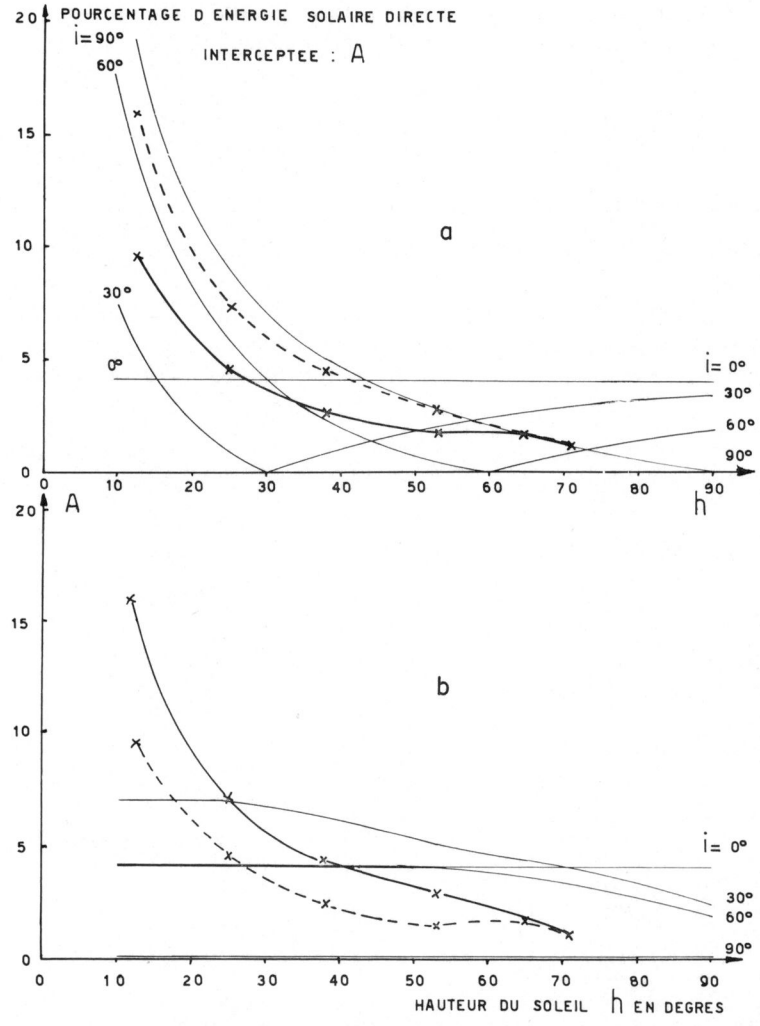



FIG. 4. — *Variations du pourcentage d'énergie solaire directe captée le matin par chaque moitié de feuillage* (est ou ouest) *en fonction de la hauteur du soleil h, calculées sur des modèles d'inclinaison constante i = 0, 30, 60, 90 degrés* (traits fins sur les deux figures 4 *a* et 4 *b*).

4 *a*: Variations du pourcentage d'énergie solaire directe interceptée en fonction de *h* pour la *feuille est* (traits continus et épais), compte tenu de son mouvement. (Valeurs relatives à la *feuille ouest* rappelées pointillés).

4 *b*: Variations du pourcentage d'énergie solaire directe interceptée en fonction de *h* pour la *feuille Ouest* (traits continus et épais) compte tenu de son mouvement. Valeurs relatives à la *feuille est* rappelées pointillés).

rayons solaires directs : S cos $\varphi$ ainsi que sur un plan horizontal : S cos $\varphi$/sin $h$. La proportion d'ombre par unité de surface de sol, donc le pourcentage d'énergie directe captée par les feuilles, A, est :

$$A = 100 \Sigma \frac{S \cos \varphi}{\sin h}$$

$\Sigma$ de toutes les feuilles recouvrant 1 m² de sol.

La figure 4 montre, au cours de la matinée, les variations du pourcentage d'énergie directe interceptée par les *feuilles est* (fig. 4 *a*) et par les *feuilles ouest* (fig. 4 *b*) en fonction de $h$ mesurées ou calculées sur les modèles décrits précédemment, ayant des inclinaisons $i$ de 0, 30, 60, 90 degrés. On notera, pour la bonne compréhension des figures, que seule une moitié de l'indice foliaire est considérée dans chacune des figures 4 *a* et 4 *b*.

Le matin, la *feuille est* (fig. 4 *a*), inclinée vers le sol pour des faibles hauteurs de soleil, se redresse pour atteindre aux fortes valeurs de $h$, une inclinaison voisine de 90 degrés. Du fait de ce mouvement il n'y a jamais d'ombre portée sur la *feuille ouest* par la feuille opposée. Ainsi les variations du pourcentage d'énergie solaire directe interceptée par la *feuille ouest*, en fonction de $h$ (fig. 4 *b*), sont-elles très différentes de celles des modèles. Après midi lorsque la hauteur du soleil décroît, le mouvement des deux feuilles s'inverse.

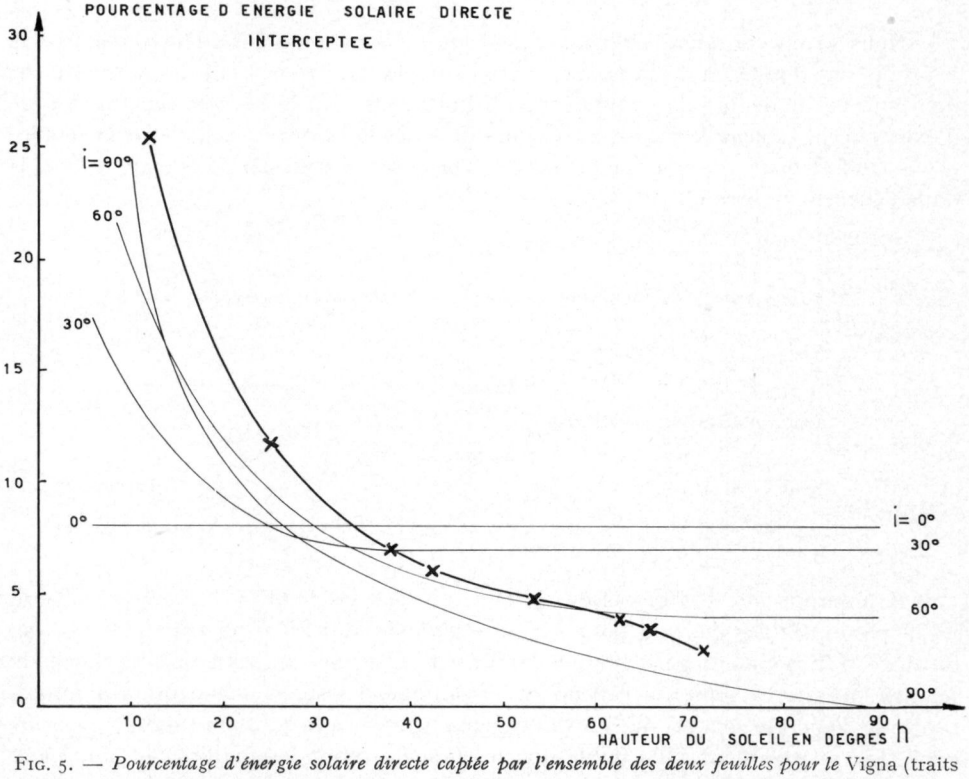



FIG. 5. — *Pourcentage d'énergie solaire directe captée par l'ensemble des deux feuilles pour le* Vigna (traits épais) *et les modèles d'inclinaison constante* $i = 0, 30, 60$ *et* $90$ *degrés, d'indice foliaire* $f = 0{,}08$, *en fonction de la hauteur du soleil* $h$.

Comme le montre la figure 5, il résulte de ceci que le pourcentage d'énergie solaire directe A captée par l'ensemble des deux feuilles et pour les faibles valeurs de $h$ (inférieures à 35 degrés), est toujours supérieur aux valeurs de A calculées sur des modèles dont les feuilles ont une inclinaison constante. Lorsque la hauteur du soleil devient plus élevée, la culture se comporte comme un couvert végétal à feuilles verticales.

### 3. 3. — *Énergie solaire globale interceptée*

A la part de rayonnement solaire direct capté, s'ajoute une certaine quantité d'énergie diffuse interceptée. ANDERSON (1969) note que l'inclinaison du feuillage a peu d'influence sur le pourcentage de rayonnement diffus capté, B. Comme il n'y a pas d'ombre portée d'une plante sur l'autre, nous avons, dans ce cas, quelles que soient les valeurs de $i$ :

$$B = f \times 100$$

La proportion d'énergie globale incidente, interceptée par le couvert végétal, C, dépend donc des valeurs respectives des rayonnements direct et diffus.

### 3. 4. — *Énergie interceptée au cours d'une journée*

Nous avons considéré les pourcentages de rayonnements direct ou global captés à un instant donné ; nous pouvons, connaissant la variation de l'énergie solaire sur une journée, en déduire la quantité qui est interceptée par le couvert végétal. A titre d'exemple, le tableau 1 donne les valeurs de C de la culture au stade deux feuilles ($f = 0{,}08$) et pour une journée où $D/G = 0{,}43$ ; D/G est la part d'énergie diffuse D dans l'énergie globale G.

TABLEAU I

*Pourcentage de rayonnement global intercepté sur une journée, C*

| | | |
|---|---|---|
| Calcul d'après les modèles = | 0 degré ..... | C = 8,1 p. 100 |
| | 30 degrés ..... | C = 7,5 — |
| | 60 degrés ..... | C = 6,9 — |
| | 90 degrés ..... | C = 5,3 — |
| Mesures sur *Vigna* ..... | | C = 6,3 — |

Il apparaît que l'interception de l'énergie par les feuilles du couvert végétal n'est pas optimale puisque pour certains modèles d'inclinaison constante (0, 30, 60 degrés) le pourcentage d'énergie captée est supérieur. L'héliotropisme des deux feuilles primitives présente cependant l'avantage d'assurer une captation importante de l'énergie solaire, dans les premières heures de la journée (fig. 6), puis une captation relativement plus faible que les modèles dont les feuilles ont une inclinaison constante. Ce comportement peut sans doute favoriser une photosynthèse active le matin et assurer une diminution de l'énergie absorbée aux heures chaudes.

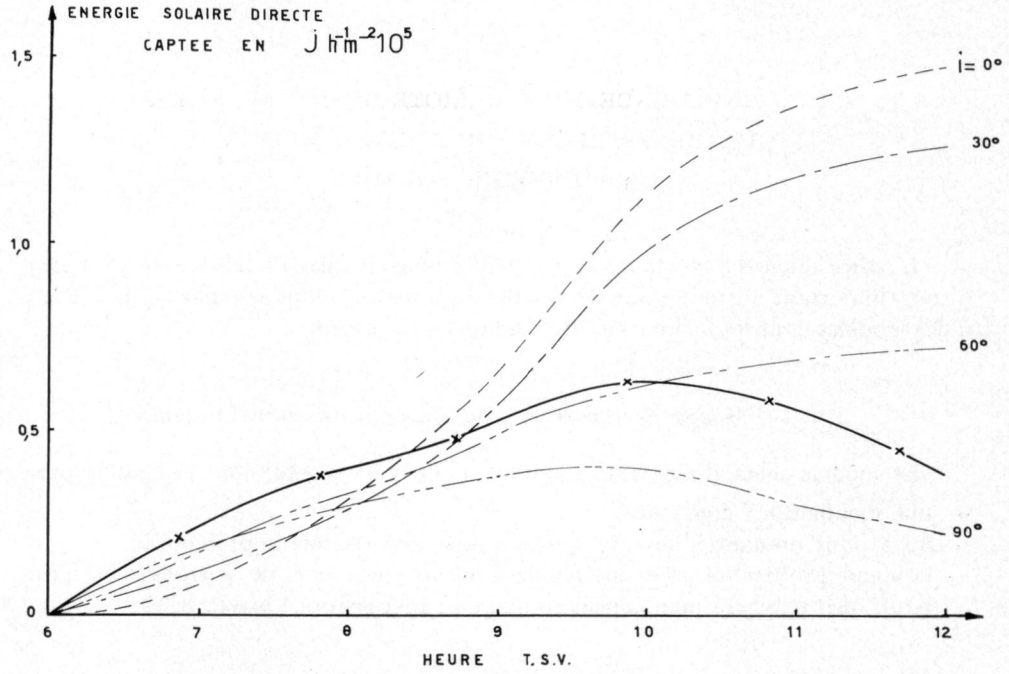



FIG. 6. — *Énergie solaire directe captée par le* Vigna (traits épais) *et les modèles d'inclinaison constante i = 0, 30, 60 et 90 degrés, d'indice foliaire f = 0,08, en fonction de l'heure T. S. V.*

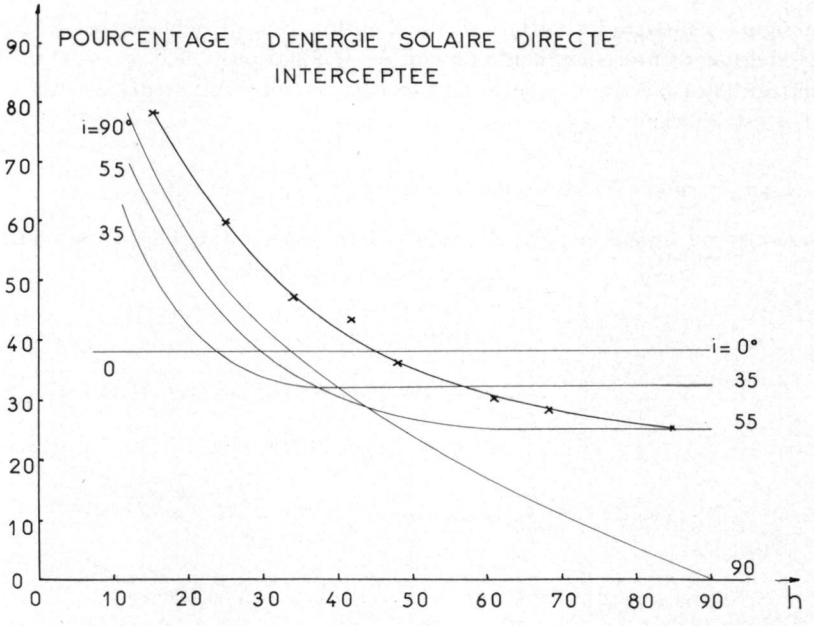



FIG. 7. — *Pourcentage d'énergie solaire directe captée par le* Vigna (croix et traits épais) *et les modèles d'inclinaison constante i = 0, 35, 55 et 90 degrés, d'indice foliaire f = 0,48, en fonction de la hauteur du soleil h.*

## IV. — INFLUENCE DE L'HÉLIOTROPISME AU STADE QUATRE FEUILLES SUR L'INTERCEPTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'indice foliaire à ce stade est $f = 0{,}48$ ; pour évaluer l'influence de l'héliotropisme (important surtout pour les folioles terminales), nous comparons la culture à des modèles dont les inclinaisons de feuilles sont constantes.

### 4. 1. — *Modèle de couvert végétal à une inclinaison constante*

Le modèle choisi (CHARTIER, 1966) est un couvert végétal dont les feuilles ont :

— une inclinaison $i$ constante,
— un azimut prenant n'importe quelle valeur avec la même probabilité,
— la même probabilité pour une feuille à un niveau donné, de se trouver en n'importe quel point du plan considéré (pas de superpositions privilégiées).

### 4. 2. — *Énergie solaire interceptée*

#### 4. 2. 1. *Pourcentage d'énergie captée.*

La figure 7 montre les variations de A en fonction de $h$, mesurées ou calculées sur le modèle décrit précédemment et ayant des inclinaisons $i$ de 0, 35, 55 et 90 degrés. Les pourcentages d'énergie solaire captée mesurés sont supérieurs à ceux calculés lorsque $h$ est inférieur à 45 degrés.

#### 4. 2. 2. *Énergie captée au cours de la journée.*

Le tableau 2 donne la part d'énergie solaire directe interceptée au cours de la journée.

TABLEAU 2

*Pourcentage de rayonnement solaire direct capté sur une journée*

| | | |
|---|---|---|
| Calcul d'après les modèles = | 0 degré ..... | 38 p. 100 |
| | 35 degrés ..... | 31 — |
| | 55 degrés ..... | 28 — |
| | 90 degrés ..... | 18 — |
| Mesures sur *vigna sinensis* ..... | | 33 — |

La part d'énergie captée par le couvert végétal est importante, sans toutefois être supérieure à celle du modèle à port horizontal. La figure 8 met en évidence le fait que l'énergie captée au cours de la journée diffère beaucoup de celle des modèles : élevée le matin, elle tend ensuite à rester relativement constante et plus faible que celle des modèles.

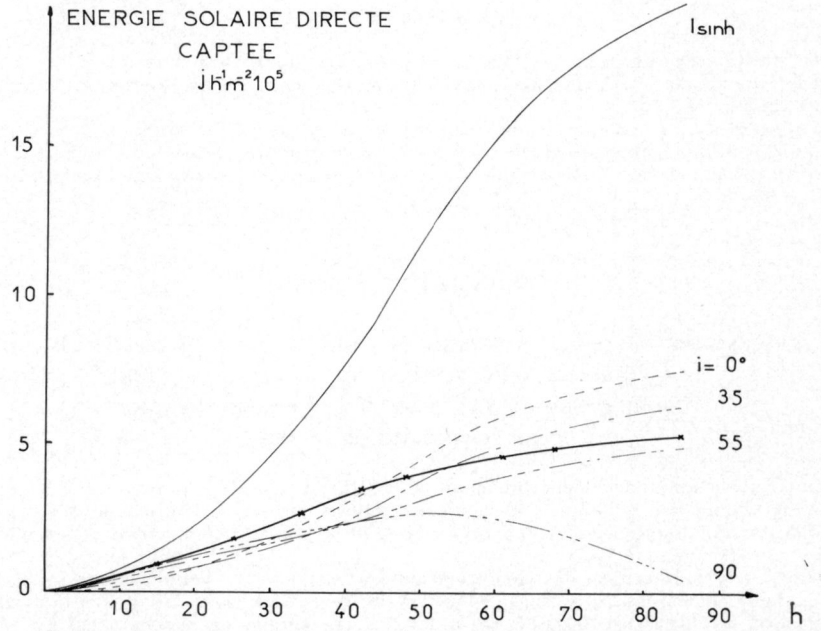



FIG. 8. — *Énergie solaire directe captée par le* Vigna (croix et traits épais) *et les modèles d'inclinaison constante i = 0, 35, 55 et 90 degrés, d'indice foliaire f = 0,48 en fonction de l'heure T. S. V.*

Isinh : énergie solaire directe sur un plan horizontal au-dessus de la culture

## V. — CONCLUSION

Aux deux stades étudiés, l'héliotropisme des feuilles de *Vigna* favorise une captation d'énergie très forte dans les premières heures de la matinée, à un moment où la photosynthèse est généralement considérée comme étant très active. Ce comportement entraîne aussi une diminution de l'énergie captée aux heures chaudes, limitant de ce fait l'élévation de la température des feuilles associée aux trop fortes conditions d'évapotranspiration.

Nous nous proposons de vérifier, dans un travail expérimental ultérieur, que cet héliotropisme place les jeunes feuilles de *Vigna sinensis* dans des conditions optimales de photosynthèse.

D'un point de vue général enfin, les méthodes de comparaison définies dans le présent article peuvent fournir des éléments utiles à l'étude des couverts végétaux au stade « jeunes plantules isolées » et à celle des autres cultures dont les feuilles ont un azimut privilégié (orientations dues au soleil et au vent).

*Reçu pour publication en février 1972.*

## SUMMARY

USE OF SOLAR RADIATION BY A CROP OF *VIGNA SINENSIS*
I. — THEORETICAL STUDY OF LIGHT INTERCEPTION AS INFLUENCED BY HELIOTROPISM

The study of heliotropism described here consists of a comparison of a crop of *Vigna sinensis* with crops the foliage of which make a given inclination over the horizontal plane (fig. 6 and 8 with two different LAI).

It appears that the heliotropism yields the interception of the greatest part of the solar energy in the early morning when the conditions for photosynthesis are favourable. On the contrary when the sun elevation is high the lowest energy trapped prevents an excess of leaf temperature.

## ZUSAMMENFASSUNG

VERWERTUNG DER SONNENENERGIE FÜR EINE KULTUR VON *VIGNA SINENSIS*
I. — THEORETISCHE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES BLÄTTERHELIOTROPISMUS AUF DAS AUFFANGEN DER SONNENSTRAHLUNGEN

Die Untersuchung des Heliotropismus einer Kultur von *Vigna sinensis* wird zunächst durch Vergleichung des Auffangens der Sonnenstrahlung durch diese Kultur und durch Kulturen deren Blätter eine beständige Neigung aufwiesen (Abb. 6 und Abb. 8 für zwei verscheidene Blattindexe) erörtert.

Daraus geht hervor, dass der Heliotropismus ein sehr starkes Auffangen der Sonnenenergie in den ersten Stunden des Vormittags begünstigt im Augenblick wo die Photosynthese allgemein als sehr aktiv erachtet wird. Dagegen ist in den heissen Stunden des Nachmittags die aufgefangene Sonnenenergie schwach, wodurch der mit den zu starken Transpirationsbedingungen verbundene Temperaturaufstieg begrenzt wird.

## РЕЗЮМЕ

Использование солнечной энергии культурой вигны (*Vigna sinensis*) I Теоритическое изучение влияния гелиотропизма листьев на перехватывание излучения.

К. ВАРЛЕ-ГРАНШЕ, Р. БОНОМ.

В начальном этапе изучения гелиотропизма вигны сравнивалось перехватывание солнечного излучения этой культурой, и культурами, листья которых, находились под постоянным уклоном (рисунки 6 и 8 для двух различных листовых показателей). Из этого изучения следует что гелиотропизм содействует уловлению крупных количеств солнечной энергии в первые утренние часы, когда, по общепринятому мнению, фотосинтез весьма активен. И, напротив, в самые жаркие часы дня солнечной энергии улавливается меньше, благодаря чему ограничивается повышение температуры, связанное с условиями слишком активной эвапотранспирации.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON M. C., DENMEAD O. T., 1969. Short wave radiation on inclined surfaces in model plant communities. *Agron. J.* **61**, 6, 867-872.

CHARTIER P., 1966. Étude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. agron.*, **17**, 5, 571-602.

CHARTIER P., 1966. Assimilation nette d'une culture couvrante. I. Détermination de l'assimilation nette de la culture à partir d'une analyse théorique. *Ann. Physiol. vég.*, **11**, 3, 221-263.

DERIEUX M., 1971. Comportement de quelques légumineuses fourragères en Guadeloupe. *Fourrages*, **45**, 93-132.

SHIMAN L. M., 1967. Détermination of the orientation of plant leaves in space. *Soviet Plant Physiol.*, **14**, 326-328.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 419-427.

# LE TRANSFERT DE L'EAU DANS LA PLANTE : ACTION PARTICULIÈRE DE LA NUTRITION AZOTÉE

M. MINGEAU et M. ROBELIN

avec la collaboration technique de Lucette Le Blevennec

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*63 - Clermont-Ferrand*

## RÉSUMÉ

L'action de la nutrition azotée sur l'absorption de l'eau et l'équilibre absorption-transpiration est étudiée sur plante entière et sur plante dont les racines sont sectionnées. Le déficit d'alimentation azotée entraîne une diminution marquée de l'absorption et la chute consécutive du taux d'hydratation et de la transpiration.

Il n'y a aucune action directe sur la régulation stomatique.

Le mécanisme se situe au niveau des résistances racinaires ou (et) du potentiel de l'eau dans la plante.

## INTRODUCTION

Le déplacement de l'eau dans la plante n'échappe pas aux règles générales de la dynamique des fluides. Ainsi, l'existence d'un mouvement d'eau d'un point du système conducteur à un autre, par exemple du substrat aux feuilles, implique nécessairement l'existence d'une différence de potentiel thermodynamique de l'eau entre ces deux points ; le débit assuré est par ailleurs en fonction inverse des résistances rencontrées le long du parcours.

On a l'habitude de considérer, en régime de transpiration, que la perte d'eau par évaporation constitue la cause essentielle d'établissement et de maintien des gradients de potentiels ; on admet de la sorte que l'absorption et le transfert de l'eau en phase liquide sont « passivement » liés à la transpiration. On a reconnu également qu'il s'établissait entre les flux d'absorption et de transpiration un équilibre dyna-

mique ; si l'absorption prend naissance sous l'action de la transpiration, le débit de transpiration peut cependant être limité par les possibilités de débit d'absorption ou de transfert liquide.

Sans mettre en doute la nature des lois régissant le déplacement, on ne peut méconnaître non plus l'incidence des facteurs biologiques sur le déroulement du processus. A titre d'exemple, on citera le travail de KRAMER (1940) concernant l'influence de l'altération du métabolisme respiratoire ou de KOZINKA (1966-1967) au sujet de l'action des substances de croissance. L'un de nous (MINGEAU, 1969) a montré également combien la dynamique de l'absorption et le niveau d'équilibre entre absorption et transpiration pouvaient être modifiés par différentes conditions de nutrition azotée.

Certaines fonctions métaboliques semblent intervenir de façon importante soit sur les conditions d'établissement des potentiels, soit sur les résistances au transfert en phase liquide à quelque niveau du système conducteur.

On ne peut exclure par ailleurs l'éventualité d'une action en retour du flux vapeur sur le flux liquide ; l'influence des facteurs métaboliques se produirait, dans cette hypothèse, au niveau de la régulation stomatique (PLEASANTS, 1930 ; DESAI, 1937), dans certains cas, par l'intermédiaire d'une altération de la photosynthèse (ZELITCH 1969).

Reprenant les essais sur l'action des facteurs nutritionnels (MINGEAU, 1969), nous avons cherché à préciser le mode d'intervention de la nutrition azotée sur la dynamique de l'eau dans la plante.

## I. — MÉTHODE

### *Principe*

Dans cette étude, nous cherchons à éliminer, sur le cheminement de l'eau à l'intérieur de la plante, certains éléments conducteurs dont les caractéristiques sont susceptibles de varier sous l'action de la nutrition minérale. La variation de transfert hydrique disparaîtra si nous supprimons l'élément conducteur sensible à cette action.

Il peut *a priori* se situer à un niveau quelconque du parcours : dans le cylindre périphérique de la racine (assise pilifère, parenchyme cortical, endoderme), dans le xylème de la tige et des feuilles, ou bien sur le cheminement de l'eau du xylène jusqu'aux surfaces d'évaporation.

Cependant, WILSON et LIVINGSTONE (1937) ont montré que la résistance au mouvement de l'eau dans le xylène était faible par rapport à la résistance dans le parenchyme des racines ou des feuilles.

Le classement relatif et aussi la présomption qu'un facteur nutritionnel doit intervenir surtout au niveau d'une régulation par voie métabolique attirent notre attention sur l'endoderme de la racine, le seul point du système conducteur où l'eau ne peut transiter par les méats intercellulaires ou les parois cellulosiques et doit obligatoirement traverser le protoplasme. RENNER (1929) et KRAMER (1933-1938) ont d'autre part montré que le débit de l'eau pompée au travers des plantes dont les racines étaient tuées ou sectionnées augmentait notablement.

Cette dernière observation est à la base de la technique que nous utilisons, technique encore assez grossière puisqu'elle consistera à sectionner les racines de plantes différemment alimentées en azote, et à contrôler l'effet de ce sectionnement sur la maintenance ou non de l'action de l'azote sur l'absorption.

### *Conditions expérimentales*

Elles sont identiques à celles décrites dans une publication antérieure (MINGEAU, 1969). L'adjonction de tubes fluorescents supplémentaires porte l'éclairement à 12 000 lux (Luxmètre F. Guerpillon type 450) contre 9 000 précédemment.

*Matériel*

La nécessité de couper les racines sous l'eau sans interrompre les mesures d'absorption et de transpiration (donc sans ouvrir les potomètres) nous a conduit à modifier légèrement le matériel. La technique adoptée dérive de celle utilisée par KOZINKA (1967). Le bouchon est traversé par une tige ; une lame de rasoir rigide est fixée à sa partie inférieure ; l'adjonction d'un bras à la partie supérieure permet de commander le mouvement de la lame (fig. 1).

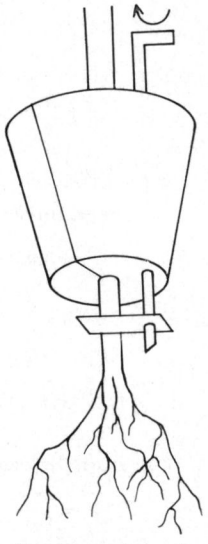


FIG. 1. — *Bouchon modifié pour le sectionnement des racines sans retirer la plante du potomètre*

Le sectionnement des racines s'effectue par simple rotation du système tige-lame ; les racines coupées tombent au fond du potomètre.

Ce sectionnement intervient en phase d'ouverture stomatique photoactive de façon à situer l'observation à la naissance du déphasage entre absorption et transpiration. Par ailleurs, un essai préliminaire nous avait montré qu'une telle opération réalisée sur une plante à débit transpiratoire élevé entraînait souvent une diminution rapide de l'absorption, vraisemblablement à la suite d'obstruction du xylène par les débris organiques.

A chaque essai, nous disposons de quatre plantes (tournesol) témoins sur solution nutritive complète et de quatre plantes cultivées sur solution sans azote depuis trois jours.

Les mesures simultanées d'absorption hydrique (par volumétrie) et de transpiration (par pesée) se ïont à intervalles réguliers (10 minutes) sur chaque plante ; celles-ci sont conservées à l'obscurité jusqu'au moment prévu pour la suppression des racines ; ainsi sectionnement et passage de l'obscurité à la lumière coïncident pour chaque plante.

A titre de contrôle et de comparaison, nous gardons intact un couple de plantes (une témoin, une carencée).

*Précision des mesures*

*Transpiration* (Tr).

La transpiration est mesurée par la variation de poids P du système potomètre-plante entre l'instant $t$ et l'instant $t + 1$ ;
erreur sur chaque pesée P : $\pm$ 20 mg.

$$P_t - P_{t+1} = \Delta P \text{ est connu à } \pm 40 \text{ mg près.}$$

erreur sur le temps : l'instant $t$ est défini à $\pm$ 5 secondes près ; l'intervalle de temps utilisé (10 mn) est connu à $\pm$ 10 secondes.

$$\text{Tr, en mg/mn}^{-1} = \frac{\Delta P}{10} \pm \frac{\Delta P \pm 40}{10 \pm 0{,}17}$$

l'erreur sur Tr s'exprime finalement comme suit :

$$\frac{\pm 0{,}17\,\Delta P \pm 400}{100 \pm 1{,}7} \simeq \pm 4 \pm 0{,}17\,\frac{\Delta P}{100}\ \text{mg/mn}^{-1}$$

*Absorption* (A).

L'absorption est mesurée par la variation du volume (V) de la solution nutritive entre l'instant $t$ et l'instant $t + 1$ ;
erreur sur chaque mesure de volume V : $\pm$ 15 mm³
$V_t - V_{t+1} = \Delta V$ est connu à $\pm$ 30 mm³ près ;
erreur sur le temps : voir plus haut,
l'erreur sur A s'écrit :

$$\frac{\pm 0{,}17\,\Delta V \pm 300}{100 \pm 1{,}7} \simeq \pm 3 \pm 0{,}17\,\frac{\Delta V}{100}\ \text{mm}^3/\text{mn}^{-1}\ (\text{ou mg/mn}^{-1})\ ;$$

pour les différentes valeurs de $\Delta P$ et $\Delta V$ enregistrées au cours d'essai, nous avons :

| $\Delta P$ ou $\Delta V$ en 10 mn | erreur sur Tr | erreur sur A |
|---|---|---|
| 500 mg | $\pm$ 5 mg/mn$^{-1}$ | $\pm$ 4 mg/mn$^{-1}$ |
| 1 000 — | $\pm$ 6 — | $\pm$ 5 — |
| 2 000 — | $\pm$ 7 — | $\pm$ 6 — |

## II. — RÉSULTATS

### 2. 1. — *Dynamique de la transpiration et de l'absorption*

#### 2. 1. 1. *Plante entière.*

Les résultats sur plante entière (témoin ou carencée) sont identiques à ceux déjà obtenus et publiés (MINGEAU, 1969), nous les rappelons brièvement :

*En solution nutritive complète* (fig. 2 $A_a$).

Les vitesses de transpiration et d'absorption évoluent selon un schéma analogue ; augmentation rapide durant la période d'ouverture stomatique photoactive (25 mn), suivie d'une chute assez prononcée, puis d'une remontée suivant une courbe d'allure sinusoïdale vers une valeur voisine du maximum antérieurement atteint. Cependant l'absorption montre un déphasage dans le temps par rapport à la transpiration ; ceci confirme l'action motrice de la transpiration sur le transfert liquide.

*En solution nutritive dépourvue d'azote* (fig. 2 $B_a$).

Dans les 15 premières mn d'ouverture photoactive, le débit de transpiration croît aussi rapidement qu'en condition normale. Par contre, la croissance du débit d'absorption est très fortement ralentie. Après 15 mn, la transpiration s'abaisse brutalement pour se stabiliser ensuite à un niveau beaucoup plus faible, marqué par le rétablissement de l'équilibre entre les débits liquide et vapeur. On assiste à une intervention brutale et précoce de la régulation stomatique.

#### 2. 1. 1. *Après sectionnement des racines* (fig. $2_b$).

On peut considérer, compte tenu de la précision expérimentale, que le *déphasage entre transpiration et absorption en période d'ouverture stomatique s'annule* ; cette observation est valable pour les deux conditions de nutrition minérale.

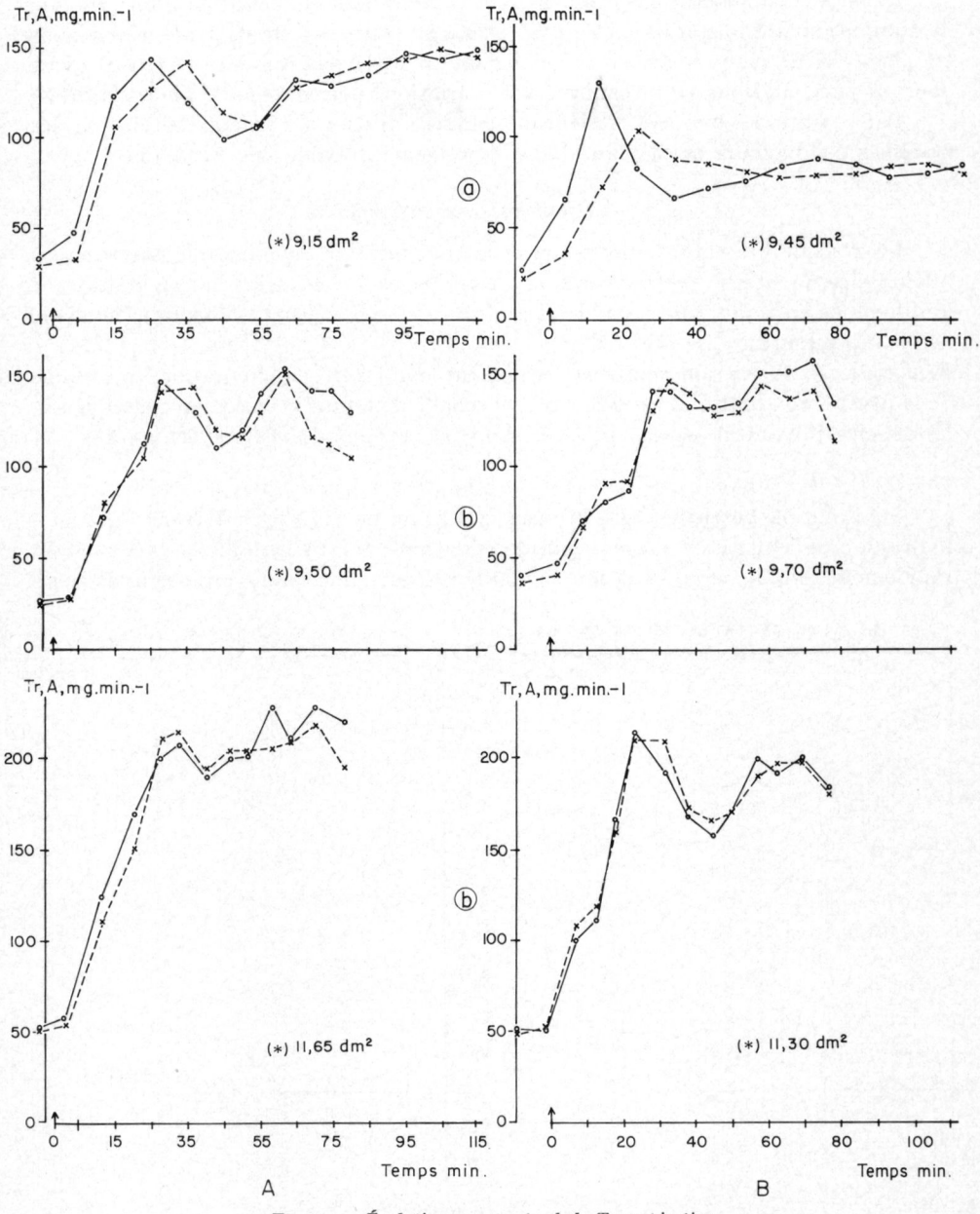



FIG. 2. — *Évolutions comparées de la Transpiration et de l'Absorption dans la période d'ouverture photoactive des stomates*

(éclairement au temps o)

* Surface foliaire.

A. Plantes sur solution complète.
B. Plantes sur solution nutritive sans azote depuis 3 jours :

*a*) plante intacte
*b*) système racinaire sectionné

Dans ces deux conditions également, on note toujours le maintien d'une période de diminution de transpiration et d'absorption, les courbes restant alors sensiblement en phase. Il ne peut s'agir ici d'une régulation hydropassive, BARRS (1968) avait pour sa part, attribué ce mécanisme aux variations périodiques de photosynthèse.

Par la suite, les mesures perdent de leur signification du fait de l'altération des systèmes conducteurs de la plante (encombrement probable des vaisseaux).

### 2. 2. — *Bilan hydrique de la plante*

Le déséquilibre entre l'absorption et la transpiration entraîne une variation du bilan hydrique interne ; cette variation est appréciée à chaque instant en établissant la différence entre les pertes par transpiration et les gains par absorption depuis le début des mesures.

*Remarque* : L'absorption compense également une légère augmentation en volume de la plante, non tout à fait négligeable à l'échelle de temps utilisée ; en conséquence, les déficits d'hydratation sont probablement un peu plus élevés que ceux notés.

#### 2. 2. 1. *Plante entière.*

Sur solution nutritive complète (fig. 3 $A_a$), on observe tout d'abord un déficit hydrique croissant à la vitesse moyenne de 15 mg mn$^{-1}$ durant 25 minutes ; ce déficit est rapidement comblé, et après 45 mn, la plante retrouve un état de turgescence normal.

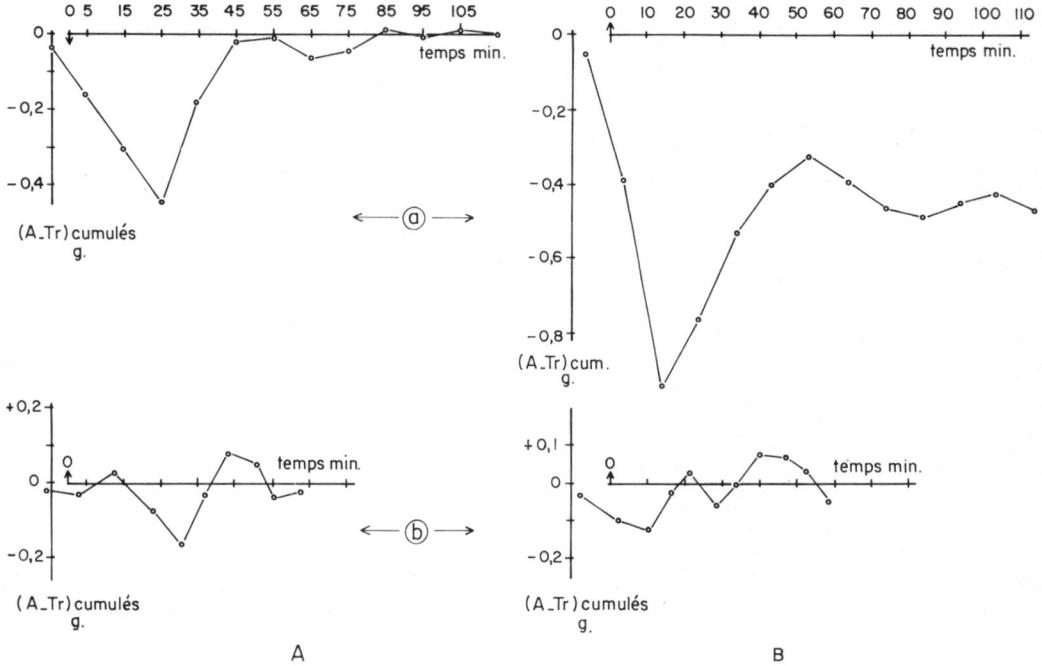



FIG. 3. — *Évolution du bilan hydrique dans la plante*
(Absorption totale — Transpiration totale) *au cours du temps*

A. Plantes sur solution complète.
B. Plantes sur solution nutritive sans azote depuis 3 jours :
*a*) plante intacte
*b*) système racinaire sectionné

Sans azote (fig. 3 $B_a$), le déficit se développe quatre fois plus vite et atteint un maximum deux fois plus élevé au bout de 15 minutes ; la fermeture stomatique consécutive ne permet pas une compensation totale, une heure et demie plus tard le déficit est encore important.

2. 2. 2. *Après sectionnement des racines.*

*Le bilan hydrique de la plante n'est à aucun moment déficitaire* quel que soit le type de nutrition (fig. 3 *b*) ; les oscillations observées sont de l'ordre de grandeur de l'erreur expérimentale.

## III. — DISCUSSION ET CONCLUSION

On a rappelé, en introduction, les processus généraux les plus invoqués dans les mécanismes de transfert de l'eau en soulignant l'interférence de certains facteurs physiologiques sur les conditions de transfert, en particulier de la nutrition azotée. Il apparaissait cependant une incertitude dans l'appréciation des mécanismes et de leur localisation ; ces mécanismes pouvaient en effet concerner soit une modification des résistances (et) ou des gradients de potentiels sur le cheminement de l'eau dans la plante, soit une modification dans la régulation stomatique, agissant en retour sur le transfert liquide ;

L'étude présentée confirme, sans ambiguité, les points suivants :

1° le rôle moteur de la transpiration sur le transfert liquide dans la plante, c'est-à-dire la nature physique du mécanisme en cause. Ce fait est matérialisé expérimentalement par l'évolution parallèle des flux liquide et vapeur, avec un retard dans le temps du flux liquide ;

2° le rôle de la racine dans le retard pris par l'absorption sur la transpiration : le retard disparaît lorsque l'on enlève cet organe ;

3° le rôle important de l'alimentation azotée sur les possibilités de transfert liquide dans la plante : à transpiration égale en phase d'ouverture stomatique le débit d'absorption est beaucoup plus faible en condition carencée ;

4° l'action de l'azote sur le transfert liquide entraîne une baisse accusée et durable de l'état d'hydratation, l'intervention rapide de la régulation stomatique hydropassive, l'abaissement du débit de transpiration.

Il est intéressant de constater qu'un déficit de nutrition azotée peut jouer sur la croissance par l'intermédiaire d'un effet de sécheresse classique : perte de turgescence et fermeture stomatique.

L'étude permet surtout de trancher sur le mode d'action à court terme de la nutrition azotée (rappelons que la déficience alimentaire n'est induite que depuis trois jours sur des plantes déjà bien développées). La suppression des racines fait disparaître les différences de comportement observées entre les deux conditions de nutrition, en particulier, les transpirations deviennent identiques ; il n'y a donc à cette échelle de temps aucune action directe de la nutrition azotée sur le fonctionnement des stomates ; le mécanisme intervient certainement le long du parcours en phase liquide, soit en *abaissant la pression osmotique en un point du circuit*, ce qui

revient à diminuer le gradient de potentiel initial, soit en *augmentant la résistance dans les racines;* les deux processus peuvent coexister.

La variation de gradient du potentiel ne peut agir sur le débit que dans la mesure où les résistances sont maintenues ; en coupant la racine, on soustrait la résistance principale, le débit liquide n'est plus alors limité que par le débit de transpiration. On peut supposer que la variation de pression osmotique présumée résulte d'un déséquilibre entre la vitesse de formation des acides aminés libres (tensioactifs) et la vitesse de protéosynthèse ; le phénomène serait localisé dans les organes où se réalise la réduction de l'azote minéral, très probablement les feuilles dans le cas du tournesol (Coïc, Lesaint et Grandjean, 1963 ; Gachon et Baucher, 1972).

En résumé, cette étude nous permet d'éliminer l'hypothèse d'une action directe de la nutrition azotée sur la régulation stomatique, mais le problème du mode d'intervention de ce facteur sur l'absorption reste posé.

*Reçu pour publication en janvier 1972.*

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement M. C. Costes pour l'aide apportée dans l'interprétation de ces résultats.

## SUMMARY

### WATER TRANSMISSION WITHIN PLANTS. SPECIFIC EFFECTS OF NITROGENOUS NUTRITION

The effects of nitrogenous nutrition on water absorption and the absorption/transpiration balance were investigated in both whole plants or plants with their roots cut off.

The nitrogenous nutritional deficiency curtails markedly such absorption, the ensuing hydration rate and transpiration.

No direct effect on stomatic control occurs.

The process chiefly depends on the resistances in the roots and/or the water potential within the plant.

## ZUSAMMENFASSUNG

### DIE BEWEGUNG DES WASSERS IN DER PFLANZE : BESONDERE EINWIRKUNG STICKSTOFFHALTIGER ERNÄHRUNG

Die Einwirkung stickstoffhaltiger Ernährung auf die Wasserabsorbierung und auf das Gleichgewicht Absorbierung-Ausdünstung wurde auf die vollständige Pflanze und auf die Pflanze mit abgeschnitteten Wurzeln untersucht. Der Fehlbetrag an stickstoffhaltiger Ernährung zieht eine ausgeprägte Verminderung der Absorbierung und die nach-folgende Herabsetzung der Wasseraufnahmerate und der Ausdünstung nach sich.

Es bestehtkeine direkte Einwirkung auf die Stomataregulerung.

Der Mechanismus liegt in gleicher Ebene mit den Wurzelwiderstanden oder (und) mit dem Wasserpotential in der Pflanze.

## РЕЗЮМЕ

Передача воды в растении. Особое действие азотного питания.

М. МЕНЖО, М. РОБЕЛЕН.

Действие азотного питания на поглощение воды и на равновесие поглощение — транспирация изучалось на целом растении и на растении с отрезанными корнями. Дефицит азотного питания вызывает сильное уменьшение поглощения, с последующим падением процента оводнения и транспирации. Но не отмечено никакого прямого действия на регуляцию устьиц.

Механизм действия расположен на уровне корневой устойчивости, или (и) потенциала влаги в растении.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARRS H. D., 1968. *Physiol. Plant.*, **21**, 918-929.

COÏC Y., LESAINT Ch., GRANDJEAN M., 1963. Sur la composition minérale des espèces et organes végétaux et leur déterminisme. *Ann. Physiol. vég.*, **5**, 293-301.

DESAI M. C., 1937. Effect of certain nutrient deficiencies on stomatal behavior. *Plant Physiol.*, **12**, 253-283.

GACHON L., BAUCHER G., 1972 La cinétique de l'absorption en éléments nutritifs majeurs chez le tournesol. *Ann. agron.*, (à paraître).

KOZINKA V., 1966. The effect of high concentration of growth substances on water uptake. *Biol. Plant.*, **8** (3), 235-245.

KOZINKA V., 1967. Water uptake during rapid changes of transpiration induced by the presence of high concentration of growth substances in root medium. *Biol. Plant.*, **5**, 3, 222-233.

KRAMER P. J., 1933. The intake of water trough dead root system and its relations to the problem of absorption by transpiring plants. *Amer. J. Bot.*, **20**, 481-492.

KRAMER P. J., 1938. Root resistance as a cause of the absorption lag. *Amer. J. Bot.*, **25**, 110-113.

KRAMER P. J., 1940. Causes of decreased absorption of water by plants in poorly aereted media. *Amer. J. Bot.*, **27**, 216-220.

LIVINGSTONE B. E., WILSON J. D., 1937. Lag in water absorption by plants in water culture with respect to changes in wind. *Plant Physiol.*, **12**, 135-150.

MINGEAU M., 1969. Action de la nutrition minérale sur l'économie de l'eau dans la plante. I. Équilibre absorption-transpiration. *Ann. agron.*, **20**, 3, 263-276.

PLAESANTS A., 1930. The effect of nitrate fertilizers on stomatal behavior. *J. Elisha Mitchel Sci. Soc.*, **46**, 95-116.

RENNER O., 1929. Versuche zur Bestimmung des Filtrations widerstandes der Wurzeln. *Jahrh Wiss. Bot.*, **70**, 805-838.

ZELITCH I., 1969. Stomatal control. *Ann. Rev. Pl. Physiol.*, 329-350.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 429-444.

# FRACTIONNEMENT DU PHOSPHORE LABILE EN RELATION AVEC LE TYPE DE SOL

L. GACHON

avec la collaboration technique de Renée DOPARIS

*Station d'Agronomie.*
*Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*63 - Clermont-Ferrand*

## RÉSUMÉ

Le fractionnement du phosphore a été réalisé selon la technique de CHANG et JACKSON sur 6 échantillons de sols du Massif Central français, soumis au préalable, pendant 3 semaines, à une agitation dans l'eau en présence de phosphore radioactif.

Ce traitement préliminaire a permis de mesurer les quantités d'ions phosphoriques labiles extraites successivement par chacun des réactifs proposés et d'apprécier indirectement leur importance relative dans la nutrition phosphatée des cultures.

Les résultats mettent en évidence :

1. la faible part du phosphore total qui est concernée par l'échange isotopique ;
2. la très faible proportion de phosphore extrait par $NH_4Cl$, mais qui est labile dans sa quasi-totalité ;
3. en sols acides, la participation dominante des phosphates solubilisés par $NH_4F$ et à un degré moindre par NaOH, le taux de labilité des premiers étant d'autre part relativement élevé (environ 50 p. 100) ;
4. en sols calcaires, la prépondérance des phosphates calciques, mais caractérisés par un degré de labilité toujours très faible ;

Finalement, pour apprécier l'état de fertilité phosphorique des sols, le fractionnement du phosphore selon CHANG et JACKSON s'est avéré moins intéressant que les données obtenues directement par dilution isotopique.

## INTRODUCTION

La méthode de CHANG et JACKSON (1957) (1) est celle qui est la plus fréquemment employée à l'heure actuelle pour réaliser le fractionnement du phosphore minéral du sol.

(1) En abrégé C. et J. dans la suite du texte.

Elle a été mise au point dans le but de mieux cerner le comportement du phosphore dans le sol, élément important aussi bien en matière de pédogenèse que de fertilité du sol.

Elle consiste à traiter au moyen de séries successives d'agitations, centrifugations, décantations et lavages une même prise d'essai de 1 g par 50 ml des réactifs suivants, choisis dans le but de solubiliser sélectivement diverses combinaisons particulières du phosphore :

1° *le chlorure d'ammonium 1 N* (agitation de 30′ à froid ; pH ≃ 4,8), qui extrait les formes les plus solubles de cet élément ;

2° *le fluorure d'ammonium 0,5 N neutre* (agitation de 1 h à froid), actif vis-à-vis des phosphates aluminiques (fraction dite P-Al) ;

3° *la soude 0,1 N* (agitation de 17 h à froid ; pH ≃ 12,4), destinée à faire passer en solution les phosphates ferriques (fraction dite P-Fe) ;

4° *l'acide sulfurique 0,5 N* (agitation de 1 h à froid ; pH ≃ 1,1) pour dissoudre les phosphates calciques (fraction dite P-Ca) ;

5° *le citrate de sodium 0,3 M combiné à l'hydrosulfite de sodium* (agitation de 15′ à 80-90°C.) pour attaquer et solubiliser les phosphates ferriques enrobés dans des précipités d'hydroxydes de fer et/ou d'alumine (fraction dite P-Fe soluble dans les réducteurs) ;

6° *le fluorure d'ammonium 0,5 N neutre* qui agit de même sur les phosphates aluminiques libérés par le traitement précédent (fraction dite P-Al occlus).

La sélectivité incomplète de ces divers réactifs à l'égard de phosphates bien définis dans leur composition chimique et minéralogique a été mise en évidence par plusieurs auteurs dont Hanotiaux (1964) et Conesa (1969). Par exemple, Hanotiaux indique les solubilités suivantes :

— 10 p. 100 d'une apatite dans $NH_4Cl$ 1 N,

— 30 p. 100 des phosphates ferriques dans $NH_4F$ 0,5 N neutre, solubilité relative abaissée à 10 p. 100 lorsque le pH est porté à 8,5 ; ce qui améliore donc la sélectivité de $NH_4F$ (Fife, 1959).

Ces conclusions sont normales dans la mesure où la méthode de C. et J., comme toutes les méthodes d'extraction chimique, aboutit à des équilibres de dissolution-précipitation régis par la loi d'action de masse avec toutes les interactions que cela implique en présence de multiples composés phosphatés.

Peu après la mise au point de leur méthode, Chang et Jackson (1958) ont montré que la distribution des formes minérales du phosphore traduit le degré d'altération chimique du sol selon une séquence où les fractions « P-Ca », « P-Al », « P-Fe » et « P occlus » occupent successivement une place prépondérante lorsqu'on passe des sols jeunes aux sols fortement évolués. On trouvera une discussion intéressante sur les aspects géochimiques de l'évolution du phosphore parallèlement à l'altération du sol en relation avec le fractionnement dans la publication récente de Williams et Walker (1969).

Par ailleurs, la méthode de C. et J. a motivé un grand nombre d'études ayant pour objet de mettre en évidence le degré d'assimilabilité pour les plantes des fractions ainsi séparées. Dès 1955 ou 1957, Kittrick et Jackson d'une part, Olsen et Watanabe d'autre part, estiment que P-Al, P-Fe et P-Ca représentent toutes les

trois, des fractions utilisables pour les plantes. Si les études ultérieures sont unanimes à considérer le phosphore soluble dans $NH_4Cl$ 1 N comme la fraction le plus facilement accessible, elles aboutissent néanmoins à des opinions divergentes pour le rôle préférentiel à accorder aux trois fractions précédentes, le type pédologique apparaissant le facteur majeur de discrimination.

C'est ainsi qu'il se dégage une opinion dominante selon laquelle, en sols acides ou même proches de la neutralité, la fraction P-Al serait la mieux apte à satisfaire les besoins de la nutrition végétale (LAVERTY et Mc LEAN, 1961 ; Mc KENZIE, 1962 ; HANLEY, 1962 ; CHANG et JUO, 1963 ; SUSUKI *et al.*, 1963 ; ALBAN *et al.*, 1964 ; PRATT et GARBER, 1964 ; DUNBAR et BAKER, 1965 ; PAYNE et HANNA, 1965 ; SMITH, 1965 ; HALSTEAD, 1967 ; MARTENS *et al.*, 1969 ; DABIN, 1970 ; TANDON *et al.*, 1971).

D'autres auteurs, ALEXANDER et ROBERTSON (1968), KHANNA (1967), ZUBRISKI (1971), KHERA et DATTA (1969), ces derniers en sols à P-Ca dominant, associent P-Fe à P-Al comme fractions les plus assimilables. Par contre, AL ABBAS et BARBER (1964), SINGH *et al.* (1966) font de P-Fe la fraction la plus efficace.

Enfin, MEHTA et PATEL (1963), HERNANDO *et al.* (1970) trouvent que dans les sols étudiés, calcimorphes pour la plupart, P-Ca constitue la principale source de phosphore assimilable.

Peu nombreuses sont, au contraire, les études de fractionnement réalisées en présence de phosphore radioactif, qui permet de connaître simultanément la distribution des ions phosphoriques labiles, c'est-à-dire des ions participant aux échanges entre la solution et les surfaces absorbantes du sol. Leurs conclusions sont convergentes et confirment le plus haut degré de labilité des fractions P soluble dans $NH_4Cl$ 1 N et P-Al (Mc KENZIE, 1962 ; DUNBAR et BAKER, 1965 ; KHANNA et ULRICH, 1967), mais aussi de P-Al et P-Fe (MACHOLD, 1963 ; BAERT et Van den HENDE, 1967). Étudiant la cinétique de la dilution isotopique, TANDON et KURTZ (1968) trouvent que, dans certains sols, le rapport des vitesses de dilution isotopique entre les fractions P-Al et P-Fe peut s'inverser après un temps de contact suffisamment long, indiquant ainsi la présence en grandes quantités de combinaisons P-Fe lentement diffusibles.

Dans le cadre des études consacrées à l'appréciation et à l'amélioration de la fertilité phosphorique des sols (GACHON, 1966 *b*, 1966 *c*, 1969, 1970), nous avons tenté de rechercher comment se distribuent entre les divers fractions séparées selon la méthode de C. et J., à l'issue d'une dilution isotopique de 3 semaines (cf. plus loin la technique adoptée),

— le phosphore total (minéral et organique),

— le phosphore labile

et quel est, enfin, le degré de labilité de chacune de ces fractions.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. — *Sols étudiés*

Les 6 sols étudiés représentent un échantillonnage des types de sols les plus fréquemment rencontrés en Auvergne. Ils comprennent :

— 3 sols calcimagnésiques carbonatés nettement argileux :

— l'un, Saint-Yvoine, est une rendzine formée sur des colluvions marnocalcaires faiblement altérées ;
— l'autre, Aigueperse, est un sol brun calcaire issu des marnes de Limagne ;
— enfin, le sol de Crouelle est également un sol brun calcaire qui s'est formé sur une zone d'épandage de colluvions marneuses et d'alluvions granitovolcaniques mélangées.

— 2 sols bruns lessivés, l'un modérément et l'autre fortement acide (Saint-Amant-Roche-Savine)
— 1 sol andique humifère, fortement désaturé, issu de roches basaltiques (Orcival).

Les principaux caractères de ces sols figurent au tableau 1.

TABLEAU I

*Caractères principaux des sols étudiés*
(p. 1 000 de terre fine sèche)

| | St-Yvoine | Aigueperse | Crouelle | St-Amant 1 | St-Amant 2 | Orcival |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Granulométrie : | | | | | | |
| Argile | 341 | 472 | 354 | 105 | 122 | 145 |
| Limon | 250 | 328 | 226 | 127 | 132 | 264 |
| Sables très fins | 138 | 62 | 103 | 88 | 97 | 68 |
| Sables fins | 139 | 45 | 112 | 154 | 138 | 112 |
| Sables grossiers | 108 | 52 | 133 | 500 | 480 | 181 |
| MO totales | 25 | 41 | 40 | 26 | 25 | 230 |
| pH (eau) | 8,3 | 7,9 | 8,05 | 6,4 | 5,3 | 5,4 |
| $CaCO_3$ | 565 | 110 | 72 | 0 | 0 | 0 |
| $P_2O_5$ (Dyer) | 0,39 | 0,59 | 0,46 | 0,33 | 0,14 | 0,53 |
| $P_2O_5$ (Joret-Hébert) | 0,09 | 0,19 | 0,37 | 0,21 | 0,09 | 0,09 |
| Aluminium libre (Al)* | 1,42 | 8,5 | 7,2 | 2,9 | 9,2 | 33,8 |
| Fer libre (Fe)* | 6,25 | 11,5 | 22,5 | 8,0 | 15,7 | 35,0 |

* Selon méthode Duchaufour et Souchier, 1966, *Sci. Sol*, **1**, 17-29.

B. — *Techniques analytiques*

1. *Phosphore isotopiquement échangeable* (E).

Une prise d'essai de 2 g de terre fine sèche préalablement broyée pour passer en totalité au travers d'un tamis de 0,2 mm est placée dans une fiole d'agitation de 250 ml en présence de 100 ml d'eau distillée, d'une solution de phosphore radioactif avec entraîneur (1 mg de $^{31}P$ par l) et d'une goutte de chloroforme pour bloquer toute évolution biologique. La radioactivité introduite R varie de 10 à 50 $\mu$Ci suivant le pouvoir fixateur du sol étudié (Gachon, 1966 *a*).

Après 3 semaines d'agitation intermittente (2 h le matin et 2 h l'après-midi) dans un local à température constante (20°C $\pm$ 2), on ajoute 1,150 g de résine anionique Dowex 2 $\times$ 4,20 - 50 mesh, préalablement débarrassée de tout grain de diamètre inférieur à 0,315 mm et occupant un volume *v*. On agite pendant une nuit avant de séparer la résine du sol sur un tamis de 0,315 mm et on lave la résine à l'eau déminéralisée.

La résine ainsi séparée est jetée dans une fiole jaugée de 50 + *v* ml en présence de HCl 0,1 N et agitée pendant 30 minutes sur agitateur magnétique. Sur cet éluat sont dosés :

— $^{31}P$ par céruléomolybdimétrie selon la technique de Duval (1962) soit *m*,
— $^{32}P$ sous compteur à fenêtre soit *r*.

L'état d'équilibre réalisé entre les ions $^{31}PO_4'''$ et $^{32}PO_4'''$ après 3 semaines de contact permet de calculer la quantité d'ions phosphoriques labiles (ou échangeables) exprimée en p.p.m. de P à partir de la formule :

$$E = \frac{R}{r} \times m - m_0$$

$m_0$ étant le $^{31}P$ introduit avec R et exprimé, comme $m$, en p.p.m. de P. R et $r$ sont contrôlées au même instant selon la même technique à partir de dilutions appropriées.

**2.** *Pouvoir fixateur.*

Diverses prises d'essai de 12,5 g sont mises en suspension dans 50 ml de $CaCl_2$ 0,01 M contenant des doses croissantes de $KH_2PO_4$. Après 2 agitations de 2 heures à une nuit d'intervalle, on sépare la phase liquide sur laquelle on dose le phosphore resté en solution. Le pouvoir fixateur a été conventionnellement assimilé à la dose de phosphates solubles nécessaire pour élever à 2 mg/l la concentration d'équilibre de la solution du sol dans ces conditions expérimentales (GACHON, 1966 *b*). La combinaison des mesures du phosphore isotopiquement échangeable (E) et du pouvoir fixateur permet d'effectuer un diagnostic satisfaisant de l'état de fertilité phosphorique des sols (GACHON, 1966 *c* ; GACHON et TRIBOI, 1970).

3. *Fractionnement du phosphore.*

La technique de dilution décrite ci-dessus (§ 1) est mise en œuvre en présence d'une radioactivité R 5 fois supérieure.

Après les 3 semaines d'agitation, la suspension est transvasée dans un tube à centrifuger de 100 ml où la phase liquide est séparée de la phase solide. Le culot de terre est alors traité selon la technique de C. et J. modifiée par HANOTIAUX (1964) : pH de la solution de $NH_4F$ 0,5 N porté à 8,5 et abandon des fractions de phosphore « occlus ». Les extractions successives ainsi que les lavages intermédiaires sont effectués directement dans les tubes de centrifugation par 50 ml des réactifs appropriés.

Sur chacun des extraits ainsi obtenus sont dosés comme précédemment $m$ et $r$.

**4.** *Phosphore résiduel et phosphore total.*

Après extraction par $H_2SO_4$ 0,5 N, le culot de terre lavé à NaCl est transvasé en capsule de platine. Après dessiccation il est soumis à une fusion alcaline.

Le phosphore total est déterminé également après fusion alcaline sur une prise d'essai indépendante.

Dans les 2 cas, le dosage de P est effectué dans les extraits liquides en appliquant la méthode de DUVAL.

## C. — *Remarques analytiques*

**1.** *Phosphore isotopiquement échangeable* (E).

Il a été vérifié que la durée du contact entre le sol et la solution radioactive exerce une influence plus importante sur la vitesse de dilution isotopique que la durée d'agitation proprement dite. Tant qu'on ne descend pas au-dessous d'une agitation quotidienne de 1 h, le résultat n'est pas modifié de façon sensible par rapport à l'agitation permanente.

D'autre part, l'agitation finale de la suspension en présence de résine anionique a pour effet de provoquer la désorption des ions $PO_4'''$ les plus facilement accessibles. En raison de l'état d'équilibre qui s'est réalisé après 3 semaines de contact, l'activité spécifique de la résine et de son éluat restent les mêmes que celle de la phase liquide initiale, si bien que E n'en est pas affecté. Par contre, la concentration en phosphore ainsi obtenue au niveau de l'éluat permet de réduire considérablement l'erreur relative affectant la mesure de $m$, donc de E, principalement dans les sols à pouvoir fixateur élevé ou à réserves labiles faibles.

C'est ainsi qu'à partir de 3 mesures effectuées selon le mode opératoire décrit plus haut, E est obtenu avec une précision comprise entre 3 et 5 p. 100 sur la moyenne. Ce qui rend généralement négligeable la correction apportée par $m_0$, qui est de l'ordre de 1 à quelques p.p.m.

**2.** *Fractionnement du phosphore.*

Le traitement (n° 3) à la soude provoque le passage en solution des matières organiques les plus humifiées, ce qui aboutit à l'obtention d'extraits particulièrement colorés dans les sols organiques où le dosage colorimétrique du phosphore est alors rendu incertain. Nous avons donc traité ces extraits par $H_2SO_4$ 2 N pour en séparer les matières organiques précipitables (pH $\simeq$ 2), suivant en cela le protocole de C. et J.

D'une façon systématique, nous avons recherché la part de P organique présent dans les divers extraits obtenus, où le phosphore organique a été assimilé à la différence entre P total

dosé après minéralisation et P minéral dosé directement par céruléomolybdimétrie. L'absence de phosphates condensés, maintes fois vérifiés, et l'hydrolyse négligeable des formes organiques du phosphore au cours de ce dernier dosage autorisent ce mode de calcul indirect de P organique.

Les résultats montrent que P organique ainsi mesuré :

— est nul ou négligeable dans les extraits $NH_4Cl$ (n° 1) et $H_2SO_4$ (n° 4) ;
— atteint des valeurs relativement importantes dans les extraits $NH_4F$ (n° 2) et NaOH (n° 3), même lorsque ce dernier est préalablement débarrassé de ses humates précipitables par $H_2SO_4$.

Enfin, il y a lieu de remarquer que la présence de phosphates solubles dans les liqueurs de lavage (impuretés éventuelles du NaCl) ou simplement de phosphore solubilisé par $NH_4F$ est susceptible de provoquer une « résorption » du phosphore en particulier en sols calcaires, phénomène lié à la présence de calcite et de fluorure de calcium, et antérieurement signalé par RAJENDRAN et SUTTON (1970) et WILLIAMS *et al.* (1971). Le même phénomène de « résorption » se poursuivrait au cours de l'extraction par la soude aboutissant à la sous-estimation des fractions P-Al et P-Fe compensée par une surestimation de la fraction P-Ca.

3. *Bilans du phosphore.*

A l'issue du fractionnement, on retrouve le $^{32}P$ introduit à $\pm$ 5 p. 100 près et, avec la même approximation, le phosphore total dosé directement à condition d'inclure le phosphore organique contenu dans les extraits à $NH_4F$ et à Na OH. Les résultats apparaissent ainsi acceptables compte tenu des causes d'erreur déjà signalées.

En raison de l'équilibre ionique réalisé entre les ions $^{32}PO_4'''$ introduit (R) et les ions $^{31}PO_4'''$ labiles préexistants dans le sol (E) à l'issue des 3 semaines de contact et d'agitation de la suspension, on peut admettre que *les ions labiles présentent une radioactivité spécifique constante dans chacune des fractions* successivement séparées par la technique de C. et J. *sous réserve que les ions solubilisés par les divers réactifs demeurent dans la phase liquide de chaque extrait* (absence d'adsorptions ou de précipitations secondaires).

On peut donc écrire, *si ces conditions sont réalisées* :

$$\underset{\text{eau distillée}}{r_1/e_1} = \underset{NH_4Cl}{r_2/e_2} = \underset{NH_4F}{r_3/e_3} = \underset{NaOH}{r_4/e_4} = \underset{H_2SO_4}{r_5/e_5} = \underset{\text{résiduel}}{r_6/e_6} = \underset{\text{échantillon global}}{R/E}$$

Les rapports extrêmes sont ceux qui servent habituellement au calcul de E puisque tous les ions $^{31}PO_4'''$ en solution dans l'eau distillée ($e_1$) sont labiles par définition. Nous rappelons cependant que E est ici calculé sur une prise d'essai indépendante et selon une méthode rendue plus précise par l'emploi d'une résine anionique et décrite ci-dessus. Les ions labiles trouvés dans chacune des fractions sont calculés de même en comparant chacun des rapports $\frac{r}{e}$ à $\frac{R}{E}$,

d'où : $$e_x = E \cdot \frac{r_x}{R}$$

ce qui permet de connaître :

— la distribution des ions labiles entre les différentes fractions séparées (indices relatifs du tableau 2),
— et le degré de labilité des ions phosphoriques de chaque fraction en comparant le phosphore labile au phosphore extrait par chaque réactif (rapport 100 *e*/*m* du tableau 2).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le fractionnement du phosphore effectué dans les conditions décrites sur les 6 sols étudiés conduit aux résultats rassemblés au tableau 2, qui appellent les observations suivantes :

TABLEAU 2

*Fractionnement du phosphore* (résultats en p.p.m. de P)

| | pH<br>1 | Pouvoir fixateur<br>2 | P total<br>3 | P-eau<br>4 | P-$NH_4Cl$<br>5 | P-$NH_4F$ (P-Al)<br>6 | P-NaOH (P-Fe)<br>7 | P-$H_2SO_4$ (P-Ca)<br>8 | P-résiduel<br>9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Saint-Yvoine* | 8,3 | 96 | | | | | | | |
| P minéral (*m*)* | | | 620 *100* | 5 *0,8* | 1,5 *0,3* | 2,5 *0,4* | 3 *0,5* | 330 *53* | 250 *40* |
| P labile (*e*) | | | **44** *100* | **4** *9,1* | **1,7** *4,0* | **0,4** *0,9* | **2,9** *6,6* | **19** *43* | **14** *32* |
| 100 *e*/*m* | | | 7,1 *100* | 80 | | 16 | 97 | 5,8 | 5,6 |
| *Aigueperse* | 7,9 | 132 | | | | | | | |
| P minéral (*m*)* | | | 880 *100* | 20 *2,3* | 3 *0,4* | 30 *3,4* | 5 *0,6* | 366 *42* | 375 *43* |
| P labile (*e*) | | | **96** *100* | **18** *18,8* | **2,0** *2,1* | **7,6** *8,0* | **4,6** *4,8* | **47** *49* | **9** *9,5* |
| 100 *e*/*m* | | | 10,9 | 90 | | 25 | 92 | 12,9 | 2,4 |
| *Crouelle* | 8,05 | 150 | | | | | | | |
| P minéral (*m*)* | | | 1 800 *100* | 10 *0,5* | 3 *0,2* | 42 *2,3* | 5 *0,3* | 990 *55* | 700 *39* |
| P labile (*e*) | | | **79** *100* | **7,6** *9,6* | **1,9** *2,4* | **10,4** *13,2* | **3,7** *4,7* | **43** *55* | **12** *15* |
| 100 *e*/*m* | | | 4,4 | 76 | | 25 | 74 | 4,3 | 1,7 |
| *Saint-Amant R. S. n° 1* | 6,4 | 70 | | | | | | | |
| P minéral (*m*)* | | | 1 095 *100* | 36 *3,3* | 3,5 *0,3* | 145 *13* | 186 *17* | 141 *13* | 403 *37* |
| P labile (*e*) | | | **160** *100* | **32** *20* | **3,1** *1,9* | **80** *50* | **39** *24,4* | **2,5** *1,6* | **2,0** *1,2* |
| 100 *e*/*m* | | | 14,6 | 89 | | 55 | 21 | 1,8 | 0,5 |
| *Saint-Amant R. S. n° 2* | 5,3 | 142 | | | | | | | |
| P minéral (*m*)* | | | 920 *100* | 11 *1,2* | 0,5 tr | 89 *9,7* | 138 *15* | 106 *11,5* | 408 *44* |
| P labile (*e*) | | | **92** *100* | **10,6** *12* | **0,6** *0,7* | **39** *42* | **25** *27* | **2,2** *2,4* | **2,9** *3,1* |
| 100 *e*/*m* | | | 10,0 *100* | 96 | | 44 | 18 | 2,1 | 0,8 |
| *Orcival* | 5,4 | 2 200 | | | | | | | |
| P minéral (*m*)* | | | 2 330 *100* | 2 *0,1* | 1 tr | 370 *16* | 235 *10* | 760 *33* | 610 *25* |
| P labile (*e*) | | | **122** *100* | **1,6** *1,3* | **0,6** *0,5* | **79** *65* | **27** *22* | **10** *8* | **8** *6,5* |
| 100 *e*/*m* | | | 5,2 | 80 | | 21 | 11,5 | 1,3 | 1,3 |

* Dans les colonnes 3 et 9 il s'agit de phosphore total, incluant P organique.

1. — *Phosphore total* (colonne 3)

Comprises entre 620 et 2 330 p.p.m., les teneurs en P total paraissent liées en premier lieu à la composition chimique des roches-mères. Les sols « primaires » issus des roches cristallines (Saint-Amant) et surtout des roches volcaniques (Orcival) sont les mieux pourvus tandis que les sols « secondaires » de Saint-Yvoine et d'Aigueperse formés aux dépens des marno-calcaires de Limagne sont les plus pauvres (COLLIER, 1945). Le sol de Crouelle occupe une position particulière du fait de la forte participation d'éléments alluviaux d'origine volcanique dans ses constituants grossiers.

Cependant, le P total peut aussi, dans une certaine mesure, refléter les apports d'engrais phosphatés effectués dans le passé, surtout dans le passé récent. La différence observée entre les 2 sols de Saint-Amant résulte surtout d'une telle influence humaine, qui est au contraire très limitée dans les autres sols n'ayant bénéficié que de fumures faibles sinon nulles.

2. — *Phosphore labile total* (E) (colonne 3)

En effet, des mesures effectuées par ailleurs nous conduisent à penser qu'en sols faiblement fertilisés le phosphore labile représente en général moins de 10 p. 100 du phosphore total. Il se confirme ici que, seul, le sol n° 1 de Saint-Amant dépasse ce pourcentage. Ce qui explique également qu'en valeur absolue, ce sol possède les meilleures réserves labiles. Entre les 6 sols étudiés, les taux de P labile varient de 44 à 160 p.p.m., c'est-à-dire dans les mêmes rapports que P total, mais classent les terres dans des ordres différents.

3. — *Phosphore soluble dans l'eau* (colonne 4)

Cette fraction qui n'appartient pas au protocole proposé par C. et J. a été préalablement séparée avant d'effectuer le traitement par $NH_4Cl$. Elle ne représente qu'une très faible part du P total ; voisine de 1 p. 100 dans les sols peu fertilisés, elle atteint 4 p. 100 dans le sol de Saint-Amant (n° 1).

Il est évidemment plus intéressant pour l'agronome de s'attacher à la fraction labile (*e*), dont les valeurs absolues correspondent d'assez près, dans l'ensemble, au phosphore minéral de cette fraction malgré un léger décalage généralisé. Les ions phosphoriques de cette fraction étant labiles par définition, il est probable que la faible perte de labilité constatée n'est qu'apparente et liée aux conditions techniques du dosage, puisque les différences par défaut sont relativement systématiques et voisines de 2 p.p.m. Nous avons précédemment souligné la meilleure reproductibilité et la meilleure précision obtenues sur la mesure de *E* lorsqu'on fait appel à une résine anionique pour accroître la concentration de la phase liquide finalement séparée.

4. — *Phosphore soluble dans $NH_4Cl$ 1 N* (colonne 5)

Le traitement par $NH_4Cl$ 1 N succédant au précédent, avec lequel il fait en quelque sorte double emploi, n'extrait que quelques p.p.m. de phosphore qui ne sont pas labiles en totalité dans la mesure où $NH_4Cl$ fait passer en solution des ions phosphoriques non touchés par l'échange isotopique, provenant de phosphates apatitiques par exemple.

### 5. — *Phosphore soluble dans $NH_4F$ 0,5 N (P-Al)* (colonne 6)

Des différences très importantes entre les sols étudiés apparaissent au contraire à ce stade du fractionnement.

Dans les 3 sols calcaires, P-Al représente un très faible pourcentage du P total (moins de 4 p. 100) confirmant les données précédemment citées. Il en va de même pour les ions labiles, mais à un moindre degré puisqu'on en trouve jusqu'à 13 p. 100 à Crouelle.

Le degré de labilité des ions phosphoriques de cette fraction (rapport 100 *e/m*) est également limité (16 à 26 p. 100), traduisant ainsi l'agressivité de la solution de fluorure d'ammonium à l'égard de combinaisons phosphatées non atteintes par l'échange isotopique. Il est vrai que dans cet environnement chimique caractérisé par la présence de fluorure de calcium, les phosphates solubilisés subissent au cours de l'agitation une « résorption » probablement liée à la formation de complexe $CaF_2$-phosphate (Williams *et al.*, 1971). Si l'on admet que les ions labiles sont les premiers à passer en solution on peut penser que ce phénomène de « résorption » les affecte plus particulièrement et contribue ainsi à réduire d'autant le degré de labilité des phosphates finalement dosés. Ce qui expliquerait aussi le plus faible rapport observé dans le sol très fortement calcaire de Saint-Yvoine.

Les sols bruns acides de Saint-Amant R.S. occupent une situation intermédiaire. *Leur fraction P-Al contient* 10 à 13 p. 100 du P total, mais *plus de 40 p. 100 du P labile.* On est donc tenté de lui accorder un rôle majeur dans l'alimentation phosphatée des cultures bien que son degré de labilité n'atteigne pas 50 p. 100. Il n'est cependant pas exclu de penser qu'en phase d'appauvrissement elle serait capable de céder des ions labiles supplémentaires puisque nos études antérieures ont montré que le pool labile mesuré par l'intermédiaire de cultures en pots (valeurs L) était toujours nettement supérieur au phosphore labile (E), même si ce dernier est mesuré après une phase de contact-agitation de 3 semaines permettant d'atteindre des équilibres ioniques plus complets (Gachon, 1966 *a*).

Enfin c'est *dans le sol andique* d'Orcival que *la fraction P-Al est relativement la mieux représentée* : 16 p. 100 du P total et surtout *les 2/3 du P labile.* Mais, en raison de la richesse de ce sol en hydroxydes, il est probable que, selon Bromfield (1970), la fraction P-Al soit sous-estimée au bénéfice de la fraction suivante par le jeu d'un phénomène de « résorption » sur les oxydes de fer des ions phosphoriques solubilisés par $NH_4F$. Dans cette éventualité, le phosphore labile et surtout le rapport 100 *e/m* de l'extrait sodique seraient au contraire les plus surestimés.

Quoi qu'il en soit, il demeure évident que $NH_4F$ fait passer en solution une grande quantité d'ions phosphoriques engagés dans des combinaisons cristallines et, de ce fait, non concernés par l'échange isotopique, et qu'il contient toujours des quantités relativement importantes de P organique s'échelonnant depuis 20 à 50 p.p.m. en sols calcaires jusqu'à 200 p.p.m. dans le sol organique d'Orcival.

### 6. — *Phosphore soluble dans NaOH 0,1 N (P-Fe)* (colonne 7)

Il est rappelé que les chiffres qui figurent au tableau 2 se rapportent exclusivement à la fraction minérale de l'extrait sodique débarrassé des matières organiques précipitables par $H_2SO_4$.

Dans les sols étudiés, on constate que P-Fe présente une distribution analogue à celle de P-Al, liée à l'alcalinité commune aux deux réactifs d'extraction. Cette fraction comprend, en effet, moins de 1 p. 100 du P total dans les 3 sols calcaires, mais 10 à 17 p. 100 dans les 3 sols acides.

Cette similitude entre P-Fe et P-Al disparaît au niveau des ions labiles, si bien que les rapports 100 *e/m* sont très élevés en sols calcaires et faibles au contraire en sols acides, sans doute plus faibles encore que ne l'indique le tableau 2 compte tenu de la probabilité des phénomènes de « résorption » évoqués au chapitre précédent. D'autant plus que, pour les premiers sols comme pour les derniers, le degré de labilité varie en sens inverse de leur teneur en fer libre.

Finalement, *les phosphates ferriques* solubilisés par la soude, *semblent faiblement participer à la nutrition phosphatée des cultures*, soit parce qu'ils sont très peu représentés dans les sols carbonatés, soit parce qu'ils contiennent peu d'ions labiles quand ils sont plus abondants comme c'est le cas en sols acides.

### 7. — *Phosphore soluble dans $H_2SO_4$ 0,5 N (P-Ca)* (colonne 8)

Au sein des 6 sols étudiés, on constate une distribution relative du phosphore complètement inversée par rapport à celles décrites pour les 2 fractions précédentes.

C'est ainsi que *la fraction P-Ca représente* :

— *environ la moitié du P total dans les 3 sols carbonatés,*
— mais seulement le 1/8 dans les 2 sols bruns lessivés,
— tandis que le sol andique d'Orcival occupe une situation intermédiaire plutôt surprenante en raison de son faible taux de Ca échangeable (4,22 méq. p. 100 g) rapporté à sa capacité cationique d'échange relativement élevée au contraire (CEC = 38,3 méq. p. 100 g à pH 7).

Dans ce dernier sol, l'extraction en milieu acide par $H_2SO_4$ solubilise plus de phosphore que ne l'ont fait les 2 réactifs alcalins réunis. On est tenté d'attribuer ce résultat à la solubilisation incomplète dans $NH_4F$ et NaOH de certains phosphates aluminiques ou ferriques plus ou moins cristallisés ou enrobés d'hydroxydes qui subiraient ultérieurement, au cours du traitement par $H_2SO_4$, un complément de solubilisation. Cette hypothèse reprise par Sommer (1966) avait également conduit Glenn *et al.* (1959) à proposer l'extraction des phosphates d'inclusion avant le traitement du sol par $H_2SO_4$.

On retrouve aussi *dans la fraction P-Ca la moitié environ du phosphore labile des 3 sols calcaires* et, au contraire, des proportions faibles à Orcival (8 p. 100) ou même négligeables à Saint-Amant. Il est ainsi confirmé qu'en sols carbonatés, la nutrition phosphatée s'effectue principalement à partir des combinaisons solubilisées par $H_2SO_4$ 0,5 N.

Mais, *le degré de labilité de ces phosphates calciques reste toujours très limité* puisque, dans le meilleur des cas (Aigueperse), il n'atteint pas 13 p. 100. Il faut y voir la conséquence de l'évolution vers des formes de plus en plus calciques et de moins en moins labiles que subissent en milieu calcaire les phosphates minéraux du sol (Arvieu, 1967), qu'il s'agisse des formes solubles incorporées par les engrais ou des formes minéralisées à partir des résidus organiques.

### 8. — *Phosphore résiduel* (colonne 9)

La détermination du phosphore résiduel, destinée à contrôler le bilan global du phosphore au sein de chaque échantillon (compte tenu du phosphore organique mis en solution par les divers réactifs) montre que cette fraction comporte 40 p. 100 environ du P total, à l'exception du sol andique où ce taux s'abaisse à 25 p. 100, mais qu'on y retrouve encore du phosphore labile.

Si la présence de 2 à 3 p.p.m. de P labile dans cette fraction résiduelle apparaît acceptable dans le mesure où elle serait due soit à la précision relative des mesures soit à l'efficacité insuffisante des lavages à NaCl pour éliminer en totalité les ions phosphoriques du culot solide (en l'occurrence les ions radioactifs), les résultats observés dans les 2 sols carbonatés et même dans le sol andique d'Orcival sont tout à fait surprenants. Ils traduiraient apparemment l'incapacité des réactifs utilisés successivement à remettre en solution les ions phosphoriques touchés par l'échange isotopique réalisé dans l'eau au cours du traitement préalable (trois semaines de contact-agitation) ; il est difficile d'admettre une telle hypothèse.

La comparaison des 3 sols calcimagnésiques montre que la quantité de P labile est la plus grande dans le sol le plus calcaire (Saint-Yvoine), surtout si on la compare au phosphore (labile ou minéral) de la fraction P-Ca. Dans un tel environnement chimique, deux phénomènes superposent alors leurs effets :

— *primo*, le réactif sulfurique utilisé est partiellement neutralisé par les carbonates du sol (presque totalement dans le cas de Saint-Yvoine). Son agressivité vis-à-vis des phosphates calciques les plus évolués est ainsi diminuée. Cette interprétation est confirmée par le fait qu'en opérant sur une prise d'essai initiale de 1 g (selon la technique proposée par C. et J.), la fraction P résiduel est diminuée au bénéfice de P-Ca. Par exemple, pour les 3 sols concernés de Saint-Yvoine, Aigueperse et Crouelle, les décalages respectifs sont de 40-45 et 75 p.p.m. La neutralisation du réactif sulfurique ne permet pas cependant d'expliquer la présence d'ions labiles dans la fraction résiduelle.

— *secundo*, en présence d'un excès d'ions $Ca^{++}$, l'addition de $H_2SO_4$ provoque l'apparition d'un précipité de sulfate de calcium sur lequel peuvent s'adsorber des ions phosphoriques (comprenant des ions labiles) échappant ainsi aux mesures effectuées sur la phase liquide de l'extrait P-Ca. La « résorption » partielle des ions labiles de la fraction P-Ca nous apparaît ainsi le mécanisme par lequel s'expliquerait leur présence notable dans la fraction résiduelle des sols calcaires.

## CONCLUSIONS

Ces résultats confirment la faible part du phosphore total des sols, 5 à 15 p. 100, qui est susceptible de participer à la nutrition minérale des plantes cultivées (ions phosphoriques labiles) et la distribution très différente du phosphore entre les fractions mises en œuvre par la méthode de C. et J. en fonction de l'environnement chimique du sol.

*Le phosphore facilement extractible* (à l'eau et/ou à $NH_4Cl$) *est également très*

*peu représenté,* même en sol de pouvoir fixateur relativement faible. Étant donné que *ces ions sont en totalité labiles,* leur valeur absolue est intéressante à considérer mais ne constitue cependant qu'une part faible ou même négligeable du pool labile : 2 à 22 p. 100. Elle est inversement liée à la capacité d'adsorption des sols pour le phosphore et en relation directe avec le pool labile, mais non avec le phosphore total.

*Entre les 3 fractions P-Al, P-Fe et P-Ca, on constate* (fig. 1) :

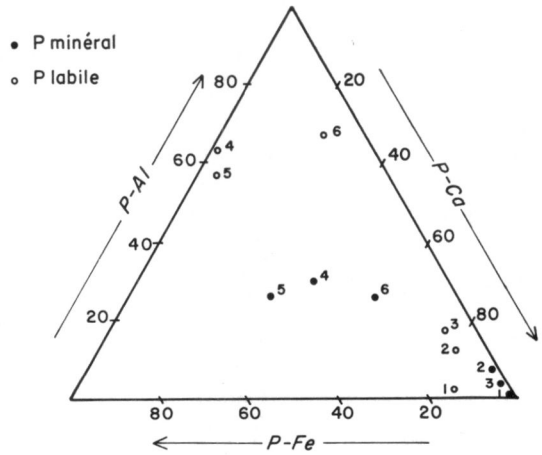



FIG. 1. — *Distribution du phosphore minéral et du phosphore labile entre les fractions P-Al, P-Fe et P-Ca*

1. Saint-Yvoine
2. Aigueperse
3. Crouelle
4. Saint-Amant 1
5. Saint-Amant 2
6. Orcival

— *la très forte prédominance des phosphates calciques dans les sols calcimagnésiques* (86 à 95 p. 100 de leur somme). Mais, dans ces conditions pédologiques, les ions labiles ne représentent qu'une part faible et variable des phosphates solubilisés par le réactif sulfurique. Si bien qu'*il est impossible de donner une interprétation correcte de la fertilité phosphorique des sols calcaires à partir de la teneur en phosphore de la fraction P-Ca.* La comparaison des sols d'Aigueperse et de Crouelle est significative à cet égard, qui associe des taux de P-Ca très différents à des quantités voisines de phosphore labile ;

— *la prépondérance de la fraction P-Ca dans le sol andique qui est,* là aussi, *illusoire pour l'agronome* puisque les ions phosphoriques y sont de loin les moins labiles. Intervenant après les réactifs alcalins, $H_2SO_4$ 0,5 N solubilise donc des composés phosphatés très peu profitables à la plante. Si l'on s'en tient aux seuls ions labiles, on constate que *c'est, au contraire, la fraction P-Al qui joue très nettement le rôle privilégié ;*

— *la distribution relativement équilibrée des 3 fractions dans les sols bruns lessivés.* Mais encore une fois, *elle traduit une fausse image de la réalité agronomique* puisque les ions phosphoriques extraits par $NH_4F$ présentent un taux de labilité supérieur d'au moins 2 fois à ceux extraits par NaOH et de 15 à 20 fois à ceux solubilisés ensuite par $H_2SO_4$ ;

— finalement, sur l'ensemble des sols étudiés, et sans tenir compte des phénomènes de « résorption » qui compliquent singulièrement l'interprétation des résultats, il

apparaît que *les ions phosphoriques labiles*, c'est-à-dire les ions les plus suceptibles d'assurer la nutrition phosphatée des plantes, *se trouvent essentiellement dans les fractions P-Ca en sols calcaires et P-Al en sols acides, mais en proportions variables à l'intérieur de chacune de ces conditions*. Ces résultats sont en accord avec la majorité des opinions formulées antérieurement.

Même sans tenir compte de la somme de travail qu'elle exige, la méthode C. et J. n'est donc pas mieux appropriée à fournir des critères d'interprétation de la fertilité phosphorique des sols que d'autres méthodes traditionnelles d'extraction chimique. A cet égard, la détermination du phosphore labile par dilution isotopique est incontestablement beaucoup plus instructive tout en étant plus facile à obtenir.

La méthode C. et J. pourrait néanmoins constituer une voie d'approche intéressante pour suivre l'évolution chimique que subissent dans le sol les diverses formes d'engrais phosphatés, ce qui fera l'objet d'un prochain mémoire.

*Reçu pour publication en mars 1972.*

## SUMMARY


### FRACTIONATING LABILE PHOSPHORUS IN RELATION WITH THE TYPE OF SOIL

Fractionation of the phosphorus was carried out, in accordance with the CHANG and JACKSON technique, with 6 test portions taken from six soils in the French Massif central and stirred in water beforehand for three weeks in presence of radioactive phosphorus.

This preliminary treatment enabled to measure the amounts of labile phosphoric ions extracted seriatim by each reagent suggested and to evaluate indirectly their relative import in the phosphated nutrition of crops.

The results show :

1. the low proportion of the total phosphorus affected by the isotopic exchange ;
2. the very low proportion of phosphorus extracted by $NH_4Cl$, and which, however, is almost fully labile ;
3. in acid soils, the prevaling share of the phosphates solubilized by $NH_4F$ and, to a lesser extent, by NaOH, the lability ratio of the former was comparatively high (about 50 p. 100) ;
4. in calcareous soils, calcium phosphates prevailed, though featuring very little lability ;

Finally, it was established that, for evaluating the phosphoric fertility condition of soils, CHANG and JACKSON's phosphorus-fractionating technique was not so efficient as are data derived direct from isotopic dilution.


## ZUSAMMENFASSUNG


### FRAKTIONIERUNG DES LABILEN PHOSPHORS IN ABHÄNGIGKEIT VOM BODENTYPUS

Die Fraktionierung des Phosphorus wurde gemäss der Technik von CHANG und JACKSON, auf sechs Bodenstichproben dem französischen « Massif central » durchgeführt. Diese Proben wurden vorher während drei Wochen eines Umruhreus im Radioactiv phosphor auf lösung unterzogen.

Diese vorbereitende Behandlung ermöglichte die durch jede der vorgeschlagenen Reagenzien nacheinander extrahierten phosphorischen, labilen Ionenmengen zur messen, und ihre relative Bedeutung für die phosphatische Ernährung der Kulturen indirekt zu bewerten.

1. den schwachen Anteil des Gesamtphosphors, der am isotopischen Austauch beteiligt ist ;
2. den sehr schwachen Anteil des, durch $NH_4Cl$, extrahierten Phosphors, welcher jedoch fast in seiner Gesamtheit labil ist ;
3. bei saueren Böden, den überwiegenden Anteil von Phosphaten, die, durch $NH_4F$, und in geringeren Mass, durch NaOH, gelöst werden. Die Labilitätsrate des erstgenantes ist and erseits verhältnismässig hoch (Ca 50 p. 100) ;
4. bei kalkhatigen Böden, das Uebergewicht von kalkhaltigen Phosphaten, das jedoch durch einen immer sehr schwachen Labilitätsgrad charakteriesiert wird.

Um den phosphorischen Fruchtbarkeitszustand der Böden zu beurteilen, hat sich die Fraktionierung des Phosphors nach CHANG und JACKSON weniger interessant erwiesen, als die direkt durch isotopische Verdünnung erhaltenen Ergebnisse.

## РЕЗЮМЕ

Фракционирование лабильного фосфора в зависимости от типа почв.

Л. ГАМОН.

В шести образцах почв Центрального Массива Франции, подвергавшися в течении трех недель встряхиванию в воде в присутствии радиоактивного фосфора, проводилось фракционирование фосфора по методике Чанга и Джаксона. Указанная предварительная обработка позволила определить количество ионов лабильного фосфора последовательно экстрагированных каждым из предложенных реактивов, и косвенно оценить их относительную роль в фосфорном питании растений.

Из полученных результатов делаются следующие выводы :

— Только небольшая часть общего фосфора принимает участие в изотопическом обмене;

— Фосфор экстрагированный с помощью $NH_4Cl$ представляет очень малую пропорцию, но весь этот фосфор лабилен;

— В кислых почвах, в обмене принимают участие главным образом фосфаты растворяемые $NH_4F$ и в меньшей степени NaOH, причем процент лабильности первых — относительно высок (приблизительно 50 %);

— В известковых почвах преобладают известковые фосфаты, характеризующиеся всегда, очень слабым уровнем неустойчивости;

Вобщем, фракционирование фосфора по методике Чанга и Джаксона оказалось менее выгодным для оценки фосфорной фертильности почв, чем прямые данные полученные при применении метода изотопического разбавления.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AL ABBAS A. H., BARBER S. A., 1964. A soil test for phosphorus based upon fractionation of soil phosphorus : I. Correlation of soil phosphorus fractions with plant-available phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 218-221.

ALBAN L. A., VACHAROTAYAN, JACKSON T. L., 1964. Phosphorus availability in reddish brown lateritic soils. I. Laboratory Studies. *Agron. J.*, **56**, 555-558.

ALEXANDER T. G., ROBERTSON J. A., 1968. Inorganic phosphorus forms in some Alberta soils as related to soil development, parent material and available phosphorus. *Canad. J. Soil Sci.*, **48**, 289-295.

ARVIEU J.-C., 1967. Évolution des phosphates solubles en présence de $CaCO_3$ ; formation de phosphates calciques apatitiques. *D. E. S. Fac. de Nice.*

BAERT L., VAN DEN HENDE A., 1967. Aspects chimiques du phosphate isotopiquement échangeable des sols. *Pédologie*, **17**, 326-340.

BROMFIELD S. M., 1970. The inadequacy of corrections for resorption of phosphate during the extraction of aluminium-bound soil phosphate. *Soil Sci.*, **109**, 388-391.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, **84**, 133-144.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1958. Soil phosphorus fractions in some representative soils. *J. Soil Sci.*, **9**, 109-119.

CHANG S. C., JUO S. R., 1963. Available phosphorus in relation to forms of phosphates in soils. *Soil Sci.*, **95**, 91-96.

COLLIER D., 1945. Solubilités dans les acides forts et teneurs totales de l'acide phosphorique et de la potasse des sols. *Ann. agron.*, 352-364.

CONESA A. P., 1969. Étude des formes du phosphore du sol par la méthode CHANG et JACKSON. *Sci. Sol*, **1**, 15-21.

DABIN B., 1970. Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. *Coton et fibr. trop.*, **25**, 2, 213-234 et **25**, 3, 289-310.

DUNBAR A. D., BAKER D. E., 1965. Use of isotopic dilution in a study of inorganic phosphorus fractions from different soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 259-262.

DUVAL L., 1962. Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais. *Ann. agron.*, **13**, 469-482.

FIFE C. V., 1959. An evaluation of ammonium fluoride as a selective extractant for aluminium-bound soil phosphorus. 1. Preliminary studies on non soil systems. *Soil Sci.*, **87**, 13-21. 2. Preliminary studies on soils. *Soil Sci.*, **87**, 83-88.

GACHON L., 1966 *a*. Observations sur la mesure du phosphore isotopiquement diluable des sols. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1103-1108.

GACHON L., 1966 *b*. Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1108-1116 .

GACHON L., 1966 *c*. Appréciation de l'aptitude des sols à alimenter les plantes en phosphore : analyses du sol et résultats expérimentaux. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1313-1318.

GACHON L., 1969. Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols. *Sci. Sol*, n° 4, 17-31.

GACHON L., TRIBOI E., 1970. Contrôle et évolution de la fertilité phosphorique de sols soumis à des essais de longue durée. *C. R. Acad. Agric.*, **56**, 501-511.

GLENN R. C., HSU P. H., JACKSON M. L., 1959. Flow sheet for soil phosphate fractionation. *Agron. Abstr.*, **9**.

HALSTEAD R. L., 1967. Chemical availability of native and applied phosphorus in soils and their textural fractions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31**, 414-419.

HANLEY K., 1962. Soil phosphorus forms and their availability to plants. *Irish J. Agric. Sci.* **39**, 62-71

HANOTIAUX G., 1964. Le fractionnement des formes du phosphore du sol ; étude critique. *Rec. Scient. en Agric.*, **1**, 173-190.

HERNANDO V., LOMBARDIA V., PARDO M. T., 1970. Corrélations entre les fractions actives de phosphore dans le sol et leur assimilabilité pour le blé. *Phosphore Agric.*, **56**, 41-50.

MCKENZIE A. F., 1962. Inorganic soil phosphorus fractions of some Ontario Soil as studied using isotopic exchange and solubility criteria. *Canad. J. Soil Sci.*, **52**, 150-156.

KHANNA P. K., 1967. Inorganic soil phosphate fractions as related to soil-test values by common methods. *Plant and Soil*, **26**, 2, 277-284.

KHANNA P. K., ULRICH B., 1967. Fractionnement des phosphates dans le sol et phosphate isotopiquement échangeable de différentes fractions phosphatées. *Z. Pfl. Ernähr. Dung. Bodenk.*, **117**, 53-65.

KHERA M. S., DATTA N. P., 1969. Study of extractants for measuring available phosphorus in soils dominant in calcium phosphate. *Indian J. Agric. Sci.*, **39**, 62-71.

KITTRICK L. A., JACKSON M. L., 1955. Rate of phosphate reaction with soil minerals and electron microscope observations on the reaction mechanism. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 292-295.

LAVERTY J. C., MCLEAN E. O., 1961. Factors affecting yield and uptake of phosphorus by different crops : III. Kinds of phosphate-native, applied and formed. *Soil Sci.*, **91**, 166-171.

MACHOLD O., 1963. De la forme de combinaison du phosphate « labile » dans le sol. *Z. Pfl. Ernähr. Dung. Bodenk.*, **103**, 132-138.

MARTENS D. C., LUTZ J. A., JONES G. D., 1969. Form and availability of P in selected Virginia soils as related to available P test. *Agron. J.*, **61**, 616-621.

MEHTA B. V., PATEL J. M., 1963. Some aspects of phosphorus availability in Gujarat soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, **11**, 151-158.

OLSEN S. R., WATANABE F. S., 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31**, 144-149.

PAYNE H., HANNA W. J., 1965. Correlations among soil phosphorus fractions extractable phosphorus and plant content of phosphorus. *J. Agr. Food Chem.*, **13**, 322-326.

PRATT P. F., GARBER M. J., 1964. Correlations of phosphorus availability by chemical tests with inorganic phosphorus fractions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 23-26.

RAJENDRAN N., SUTTON C. D., 1970. Resorption of soil phosphate during fractionation. *J. Soil Sci.*, **21**, 1, 199-202.

SINGH R. N., MARTENS D. C., OBENSHAIN S. S., 1966. Plant availability and form of residual phosphorus in Davidson clay loam. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 617-620.

SMITH A. N., 1965. The supply of soluble phosphorus to the wheat plant inorganic soil phosphorus. *Plant and Soil*, **22**, 314-316.

SOMMER G., 1966. The fractionation of inorganic phosphates in soil. *Z. Pfl. Ernähr. Dung. Bodenk.*, **113**, 215-226.

SUSUKI A., LAWTON K., DOLL E. C., 1963. Phosphorus uptake and soil tests as related to forms of phosphorus in some Michigan soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 401-403.

TANDON H. L. S., KURTZ L. T., 1968. Isotopic exchange characteristics of aluminium and iron bound fractions of soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**, 799-802.

TANDON H. L. S., TYNER E. H., WALKER W. M., 1971. The relation of labile phosphorus to soil inorganic phosphorus forms : evaluation by regression analysis. *Proc. New Dehli Indian Soc. Soil Sci.*, 105-109.

WILLIAMS J. D. H., WALKER T. W., 1969. Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zealand basaltic soil profiles. I. *Soil Sci.*, **107**, 22-30. II. *Soil Sci.*, **107**, 213-219.

WILLIAMS J. D. H., SYERS J. K., HARRIS R. F., ARMSTRONG D. E., 1971. Fractionation of organic phosphate in calcareous lake sediments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35**, 250-255.

ZUBRISKI J. C., 1971. Relationship between forms of soil phosphorus, some indexes of phosphorus availability and growth of sudangrass in greenhouse trials. *Agron. J.*, **63**, 421-425.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 445-459.

# CAUSES DE LA GERMINATION SUR PLANTE DE GRAINS IMMATURES DE MAÏS

## II. — Données complémentaires

W. ROUTCHENKO et J.-P. SOYER
avec la collaboration technique de R. Chignon

*Station d'Agronomie*
*Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,*
*33 - Pont-de-la-Mave*

## RÉSUMÉ

Le grain de maïs germe sur plante avant d'avoir atteint sa complète maturité si sa teneur en acide β-indolacétique, élevée au stade laiteux, ne diminue pas au moment où il parvient au stade pâteux. La dégradation normale de l'acide β-indolacétique nécessite une activité oxydative adéquate qui dépend, pour une large part, des activités relatives de Fe et de Mn dans la graine. Les variations du potentiel d'oxydo-réduction du sol influencent différemment l'assimilabilité de Fe et de Mn et modifient leur rapport dans la plante. L'analyse habituelle du sol n'est pas en mesure de fournir des indications suffisamment précises pour établir une distinction entre le sol où le maïs germera sur plante et celui où il mûrira normalement.

Les mesures générales de protection proposées contre ces accidents pourraient être les suivantes :

— en sols acides, riches en Fe libre et en Mn actif : élévation du pH et assainissement du sol ;

— en sols calcaires : apport de micro-éléments sous une forme les protégeant de l'oxydation. et régulation du régime hydrique.

## INTRODUCTION

Dans une précédente publication (Routchenko et Soyer, 1971), nous avons rapporté les premiers résultats de nos recherches concernant les causes de la germination sur plante de grains immatures de maïs. Un tel accident est observé principalement dans les sols calcaires de Charente et de Charente-Maritime, mais se produit aussi, bien que plus rarement, dans les sols acides récemment défrichés des Landes et des Pyrénées-Atlantiques.

Les analyses des plantes manifestant ces troubles nous ont permis d'établir que leur composition chimique ne présentait, en ce qui concerne les macro-éléments, aucune anomalie caractéristique, si ce n'est un ralentissement de la réduction de l'ion nitrique.

Sur milieu synthétique, nos expériences relatives au développement d'embryons excisés nous ont permis de déceler la présence, dans les grains prédisposés à la germination prématurée, d'un facteur activant le développement. Ces expériences ont également démontré que la plus ou moins grande propension à la germination est liée aux caractéristiques de la variété ainsi qu'aux conditions du milieu.

En grande culture, les apports de certains micro-éléments se sont montrés capables d'exercer une action protectrice vis-à-vis de la germination prématurée, surtout lorsqu'ils étaient combinés à de fortes doses de phosphore.

Ces constatations ont conduit à formuler l'hypothèse selon laquelle la germination sur plante de grains immatures de Maïs serait en relation avec le patrimoine génétique de la variété et aussi avec les conditions d'approvisionnement des plantes en micro-éléments, principalement fer et manganèse, et vraisemblablement molybdène.

D'autre part, POLEVOY (1959) montre que la teneur en acide β-indolacétique du grain de Maïs au cours de sa maturation s'élève très fortement jusqu'au stade pâteux, atteint début septembre, puis diminue progressivement. Selon JANSSEN (1969), la résistance des céréales (Riz, Avoine, Orge) à la germination prématurée serait en relation avec la teneur en auxine du grain. Au cours de la maturation, l'auxine, abondante dans un grain au stade laiteux, est dégradée par voie oxydative. Il se forme ainsi le 3-méthylène-oxy-indol, qui serait l'inhibiteur spécifique de la germination prématurée. Le $Cu^{++}$, d'après STUTZ (1957), inhibe l'oxydation de l'acide β-indolacétique, au cours de la maturation du grain. Cette inhibition serait levée partiellement par $Mn^{++}$. L'oxydation de l'auxine est, par contre, plus forte en présence de $Fe^{+++}$ et de $Co^{++}$, surtout si ces deux cations sont associés à $Mn^{++}$.

La présente note rapporte les résultats des recherches que nous avons poursuivies sur le problème de la germination prématurée du grain de Maïs. Ces recherches intéressent les divers points suivants :

— enquêtes réalisées dans les exploitations agricoles ;
— étude physique et chimique des sols ;
— expérimentation sur le terrain ;
— cultures en milieu contrôlé ;
— étude de la composition chimique des grains de maïs ;
— essai de reproduction expérimentale de la germination prématurée.

## RÉSULTATS

### 1. — *Résultats des enquêtes*

Le questionnaire portait sur la constitution physique ainsi que sur la composition chimique du sol, les précédents culturaux et les techniques culturales.

Les résultats relatifs à 18 exploitations des Landes et Pyrénées-Atlantiques, à

5 exploitations de Charente et Charente-Maritime et à 2 exploitations de la région de l'Armagnac n'ont permis de dégager aucun élément nouveau. Dans quelques cas, il a cependant été possible d'établir une relation entre le pH du sol, le taux de matière organique et la gravité des accidents, sans que toutefois ces résultats puissent être généralisés.

### 2. — *Étude physique et chimique des sols*

Afin de déterminer les caractéristiques du sol qui pourraient être liées à la germination prématurée du Maïs, nous avons procédé à l'analyse d'un grand nombre d'échantillons de sols provenant, les uns de terrains où le phénomène s'était manifesté l'année précédente, les autres de parcelles limitrophes où le maïs avait mûri normalement.

Les déterminations suivantes ont été effectuées par le Laboratoire d'Analyse des Sols de l'I. N. R. A. (Bordeaux) : granulométrie, matière organique, calcaire total, calcaire actif, pH eau et pH KCl, carbone, azote, C/N, capacité d'échange, cations échangeables ($Ca^{++}$, $Mg^{++}$, $K^{+}$, $Na^{+}$), $P_2O_5$, fer total, fer libre, Mn actif.

Les résultats des analyses physiques et chimiques portant sur 15 couples d'échantillons provenant de sols calcaires (15 sols où le maïs a germé sur pied et 15 sols contigus où il a mûri normalement) ont été soumis à une analyse factorielle, réalisée par la Station de Biométrie de Nancy. Cette analyse a démontré que, pour l'ensemble des caractères étudiés, les deux populations ne se différenciaient pas. Toutefois, la variation globale observée peut s'expliquer pour 48 p. 100 par une opposition entre le Mn actif, les colloïdes minéraux, le fer d'une part, le calcium et le pH d'autre part, pour 21 p. 100 par une opposition entre les teneurs en N p. 1 000, sable, matière organique, Fe et celle en limon, pour 13 p. 100 par une opposition entre la teneur en azote (p. 1 000) et celle en limon et matière organique (BADIA, 1971).

Ainsi, l'analyse factorielle établit l'impossibilité de prévoir, à partir d'une analyse physico-chimique habituelle, si la germination prématurée se manifestera ou non dans un sol donné. Cependant, dans 82 p. 100 des cas, elle indique qu'une relation pourrait exister entre : d'une part, le fer, le manganèse et la plupart des facteurs suceptibles de modifier leur assimilabilité, et, d'autre part, la manifestation du phénomène étudié. Cette insuffisance tient vraisemblablement au fait que l'analyse de routine d'un sol ne renseigne principalement que sur sa constitution et sa composition à un moment donné et ne fournit que peu d'indications sur le dynamisme des phénomènes physiques, chimiques et biologiques dont il est le siège.

### 3. — *Expérimentation sur le terrain*

Deux essais identiques furent établis : d'une part, au lieudit Le Mesnil, en Charente-Maritime, et, d'autre part, à Porcheresse, en Charente, dans des sols où la germination du Maïs sur plante avait été observée les années précédentes.

L'objet de l'étude était de rechercher les effets dus à l'apport de Fe et de Mn ou de l'un de ces deux éléments, dans des sols où l'aération était plus ou moins intense à la suite de travaux appropriés.

Les traitements comprenaient l'apport de Mn sous forme frittée, à raison de 50 kg/ha d'un produit titrant 54 % de Mn, et l'apport de fer sous forme chélatée, à raison de 20 kg/ha d'un produit renfermant 6 % de Fe.

A la fertilisation N, P, K, on a ajouté sur l'ensemble des dispositifs 100 kg/ha de $ZnSO_4$, car l'insuffisance en Zn de ces sols était par ailleurs bien établie.

Chacun des dispositifs a fait l'objet de deux modes de préparation des sols, déterminant deux niveaux d'aération.

Ces expériences ont donné les résultats suivants :

*Au Mesnil.* — Au stade 8 feuilles, sur la partie du dispositif où le sol a été préparé sommairement, on observe une importante réduction de croissance, moins marquée cependant sur les parcelles où Fe et Mn avaient été apportés conjointement. L'analyse des plantes indique que cette amélioration, due à l'apport des deux oligo-éléments, correspond à une absorption plus intense et à une meilleure utilisation de l'azote.

TABLEAU I

*Le Mesnil, 1970 : pourcentage d'épis germés*

| Sol préparé sommairement | | | | | Sol préparé normalement | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Blocs | Témoin | Fe | Mn | Fe + Mn | Blocs | Témoin | Fe | Mn | Fe + Mn |
| 1 | 3,8 | 7,3 | 11,6 | 5,7 | 5 | 17,3 | 21,4 | 15,7 | 14,3 |
| 2 | 7,8 | 14,6 | 10,3 | 3,5 | 6 | 34,4 | 44 | 21 | 8,6 |
| 3 | 12,9 | 10,6 | 8,2 | 4,3 | 7 | 21,4 | 6,8 | 6 | 1,2 |
| 4 | 8,7 | 29,9 | 14,1 | 11,1 | 8 | 3,8 | 4,2 | 11,5 | 0 |
| Moyenne | 8,30 | 15,60 | 11,05 | 6,15 | Moyenne | 19,12 | 19,10 | 13,55 | 6,02 |

A la floraison, les différences de croissance s'estompent. Les comptages d'épis germés à la récolte permettent de dresser le tableau 1.

Ce tableau montre que, le plus fréquemment, la germination est plus intense en sol bien préparé, sauf pour les parcelles recevant un apport simultané de Fe et de Mn. Ce fait suggère que l'aggravation des accidents est bien due à une diminution de Fe et de Mn à la suite d'une aération plus intense du sol.

*A Porcheresse.* — Les résultats enregistrés sur ce dispositif sont voisins de ceux recueillis au Mesnil (tabl. 2).

TABLEAU 2

*Porcheresse, 1970 : pourcentage d'épis germés*

| Sol préparé normalement | | | | | Sol préparé intensément | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Blocs | Témoin | Fe | Mn | Fe + Mn | Blocs | Témoin | Fe | Mn | Fe + Mn |
| 1 | 7,7 | 7,1 | 2,1 | 0 | 4 | 3,8 | 1,7 | 4,7 | 2 |
| 2 | 8,9 | 6,0 | 2,7 | 9,1 | 5 | 11 | 34 | 12,7 | 4,8 |
| 3 | 45,9 | 30 | 25,5 | 3 | 6 | 23,8 | 11,8 | 10,5 | 12,2 |
| Moyenne | 20,83 | 14,36 | 10,10 | 4,03 | Moyenne | 12,86 | 15,83 | 9,30 | 6,33 |

### 4.— *Cultures en milieu contrôlé*

L'expérimentation entreprise avait pour objet l'étude de la réaction de deux variétés de maïs à une insuffisance ou à un excès de Fe et de Mn dans le milieu nutritif. Les deux variétés étudiées étaient : d'une part, *I. N. R. A. 260*, particulièrement sensible aux accidents, d'autre part, *Funk's G. 266*, relativement résistante. L'essai était conduit sous serre, sur sable de quartz arrosé périodiquement par une solution nutritive renouvelée.

L'essai comprenait cinq traitements, les teneurs en Mn et en Fe des solutions nutritives étaient les suivantes (en mg/l) :

| | Fer | Manganèse |
|---|---|---|
| | — | — |
| Témoin | 5,55 | 0,97 |
| Traitement insuffisant en Fe | 1,35 | 0,97 |
| Traitement excessif en Fe | 11,10 | 0,97 |
| Traitement insuffisant en Mn | 5,55 | 0,25 |
| Traitement excessif en Mn | 5,55 | 2,00 |

Les résultats de l'expérience (tabl. 3) ont été appréciés de la manière suivante :

— notation des symptômes visibles de carences et de toxicités,
— analyse des sucs en cours de végétation,
— pesée des plantes à la récolte,
— détermination de Mn et de Fe dans la matière sèche des feuilles.

TABLEAU 3

*Réaction de deux variétés de maïs,* I. N. R. A. 260 *et* Funk's G. 266 *aux différents niveaux de leur alimentation en Fe et en Mn*

| Traitements | Symptômes apparents relevés en cours de végétation | Poids m. f. en % du témoin | | Teneurs en Fe et en Mn (en p.p.m.) des feuilles | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Fe | | Mn | | Fe/Mn | |
| | | *INRA* | *Funk's* | *INRA* | *Funk's* | *INRA* | *Funk's* | *INRA* | *Funk's* |
| Témoin | Plantes normales | 100 | 100 | 83 | 83 | 57 | 58 | 1,46 | 1,43 |
| 2 Fe | Excès Fe sur *I. N. R. A. 260* | 95 | 90 | 90 | 100 | 52 | 58 | 1,73 | 1,72 |
| 2 Mn | Excès Mn sur *I. N. R. A. 260* | 70 | 105 | 85 | 85 | 77 | 94 | 1,10 | 0,90 |
| 1/4 Fe | Déficience Fe s./les 2 variétés | 39 | 76 | 75 | 75 | 88 | 89 | 0,85 | 0,84 |
| 1/4 Mn | Déficience Mn s./les 2 variétés | 65 | 68 | 80 | 83 | 25 | 24 | 3,20 | 3,46 |

Les données du tableau 3 montrent que les plantes se développent normalement et élaborent le maximum de matière végétale lorsqu'elles sont alimentées par une solution équilibrée en Fe et en Mn. Les teneurs en Fe et en Mn des deux variétés sont alors très voisines.

En présence d'un excès de Fe, la réaction des deux variétés demeure semblable. Par contre, *I. N. R. A. 260* se montre moins tolérante que *Funk's G. 266* vis-à-vis d'un excès de Mn.

Les deux variétés réagissent de manière analogue à une déficience en Mn mais la croissance d'*I. N. R. A. 260* est nettement plus réduite que celle de *Funk's G. 266* lorsque Fe manque dans le milieu.

Il apparaît ainsi qu'*I. N. R. A. 260* est beaucoup plus sensible à une déficience en Fe et à un excès de Mn que ne l'est *Funk's G 266*, caractère qui pourrait se rattacher à sa sensibilité vis-à-vis de la germination prématurée.

A partir des indices figurant au tableau 3, il est possible d'établir la signification des différentes valeurs du rapport Fe/Mn pour chacune des deux variétés :

| | *I. N. R. A. 260* | *Funk's G. 266* |
|---|---|---|
| Équilibre optimal ..... | 1,30 — 1,50 | 0,90 — 1,43 |
| Insuffisance en Fe ou excès de Mn | < 1,10 | < 0,85 |
| Insuffisance en Mn ou excès de Fe | > 1,70 | > 1,72 |

La valeur de ces rapports n'est pas très éloignée de celle indiquée par BENTON-JONES (1970), qui donne comme valeurs normales pour la 7e feuille en partant du sommet : Fe = 129 p.p.m., Mn = 105 p.p.m., d'où le rapport Fe/Mn = 1,23. Les

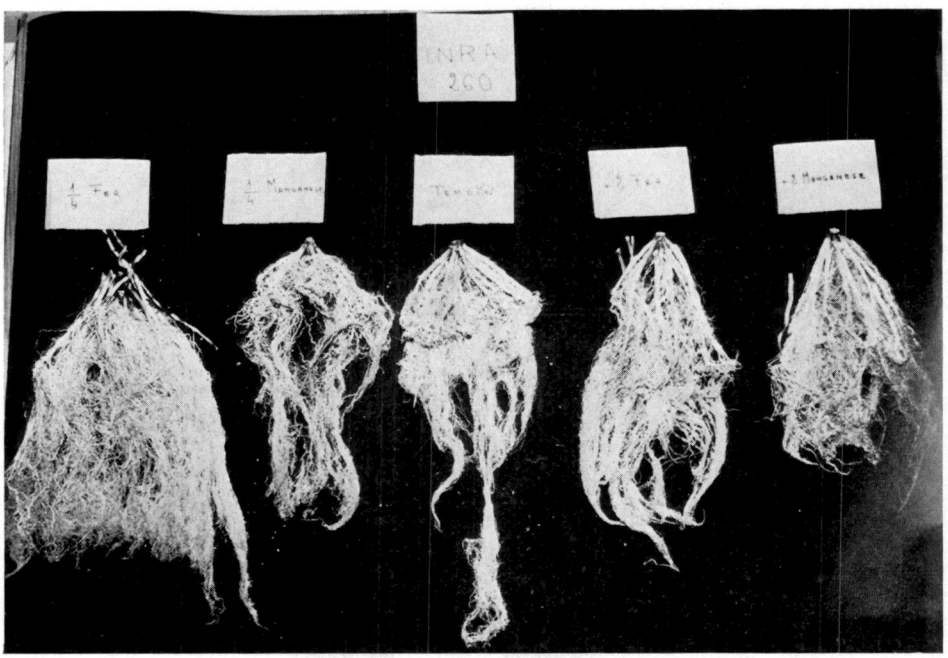



FIG. 1. — *Développement du système radiculaire, du maïs, en fonction de la concentration du fer et du manganèse dans le milieu*

différences entre les niveaux de Fe et de Mn indiqués par BENTON-JONES et ceux que nous avons obtenus proviennent vraisemblablement du fait que nos analyses portent sur des plantes au stade de 9 feuilles, alors que les références de BENTON-JONES

concernent la feuille de l'épi au moment de la floraison. Par ailleurs, JACOBSON (1964) considère qu'au-dessous de 56 p.p.m. de Fe dans la feuille de l'épi, on se trouverait dans une zone de carence caractérisée en Fe, alors que, dans notre expérience, elle apparaît déjà à 75 p.p.m. si le rapport Fe/Mn est de 0,85. De leur côté, SCHARRER et JUND (1956) estiment que 110 p.p.m. de Mn dans la feuille de l'épi correspondent à une teneur optimale, alors que dans notre expérience *I. N. R. A. 260* extériorise des symptômes d'excès de Mn à partir de 70 p.p.m.

Nos valeurs se rapprochent plus de celles obtenues par AGUILAR (1969), au même stade que celui étudié dans notre expérience, pour des plantes se développant bien : Fe = 80 p.p.m. ; Mn = 63 p.p.m. ; Fe/Mn = 1,27.

A la récolte des plantes parvenues à complète maturité, nous avons constaté que le système radiculaire de la variété *I. N. R. A. 260* sous-alimentée en Fe était considérablement plus développé que celui du témoin et du *Funk's G 266* soumis au traitement correspondant. La photographie ci-avant (fig. 1) montre les différences de développement des systèmes radiculaires d'*I. N. R. A. 260* en fonction des traitements.

### 5. — *Étude de la composition chimique du grain de Maïs*

Nous avons d'abord dosé le fer et le manganèse dans les cendres de grains provenant du même champ, mais prélevés les uns sur des épis partiellement germés et les autres sur des épis ayant mûri normalement. Le manganèse a été dosé par la méthode au periodate de K et le fer par absorption atomique. Les résultats de ces dosages figurent au tableau 4.

L'examen de ce tableau permet de faire les constatations suivantes :

— Il n'existe pas de niveau spécifique en Mn et Fe ni un rapport Fe/Mn qui serait caractéristique d'une prédisposition à la germination prématurée. Par contre, si l'on examine les valeurs se rapportant au même couple d'échantillons, on constate que les grains provenant d'épis partiellement germés renferment systématiquement plus de manganèse que ceux prélevés sur les épis ayant mûri normalement (une seule exception : échantillon *I. N. R. A. 260* n° 6 provenant d'Archiac). De ce fait, le rapport Fe/Mn est généralement plus élevé dans le grain normal.

— Le plus souvent, les taux de Fe et de Mn sont relativement bas si on les compare aux valeurs de référence indiquées par ANDREENKO et KOUPERMANN (1959). Par contre, le niveau du fer serait voisin de la normale si on se rapporte aux indices fournis par BENNE *et al.* (1964), qui trouvent 19,6 p.p.m. de Fe et 5 p.p.m. de Mn dans le grain provenant d'une culture ayant produit 76,23 q/ha de maïs. Le rapport Fe/Mn qui ressort de ces valeurs serait 3,90, nettement plus bas que ceux que nous enregistrons. Il nous faut donc considérer que la plupart des échantillons analysés ont une teneur globale en Fe proche de la normale alors que la majorité d'entre eux serait déficiente en Mn. Cependant, cette déficience ne peut être directement mise en cause dans la germination prématurée du maïs : en effet, elle est plus accentuée dans le grain mûri normalement que dans le grain germé. Il paraît donc probable que ce soit la forme et l'activité de Fe et de Mn qui interviennent plus que les quantités de ces éléments contenues dans le grain, comme cela est fréquemment observé dans le cas de la chlorose ferrique.

Au cours de notre étude préliminaire (ROUTCHENKO et SOYER, 1971), les analyses pratiquées sur les plantes pendant leur végétation avaient permis de constater que la réduction des nitrates, dans les maïs prédisposés à la germination prématurée, était considérablement ralentie. Ce fait nous a conduits à procéder au dosage du molybdène dans le grain normalement mûri, comparativement au grain provenant d'épis partiellement germés. Les résultats de ces dosages, réalisés par colorimétrie de $Mo(SCN)_5$, après minéralisation nitro-perchlorique, sont résumés dans le tableau 5.

TABLEAU 4

*Teneurs du grain en Fe et en Mn* (p.p.m.)

| Variété de maïs et provenance des échantillons | Grains d'épis normaux | | | Grains d'épis germés | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mn | Fe | Fe/Mn | Mn | Fe | Fe/Mn |
| *I.N.R.A. 258* : 40 - Pécorade | 1,50 | 15,00 | 10,00 | 3,50 | 14,00 | 4,00 |
| *I.N.R.A. 260* : 16 - Blanzac 1 | 1,00 | 20,00 | 20,00 | 2,50 | 15,00 | 6,00 |
| — — 2 | < 1,00 | 17,50 | 17,50 | 3,50 | 20,00 | 5,71 |
| — 17 - Archiac A | 0,84 | 22,50 | 26,79 | 1,12 | 20,00 | 17,86 |
| — — 1 | 3,08 | 22,50 | 7,31 | 3,64 | 22,50 | 6,18 |
| — — 2 | 3,92 | 20,00 | 5,10 | 4,20 | 27,30 | 6,50 |
| — — 3 | 2,80 | 25,00 | 8,93 | 3,92 | 28,75 | 7,33 |
| — — 4 | 0,84 | 20,00 | 23,81 | 1,68 | 22,50 | 13,39 |
| — — 5 | 3,64 | 17,50 | 4,81 | 6,44 | 30,00 | 4,66 |
| — — 6 | 3,08 | 22,50 | 7,31 | 2,24 | 32,00 | 14,29 |
| — — 7 | 4,76 | 22,50 | 4,73 | 6,44 | 25,00 | 3,88 |
| — — 8 | 1,12 | 20,00 | 17,86 | 1,68 | 22,50 | 13,39 |
| — — 9 | 4,20 | 22,50 | 5,36 | 7,56 | 25,00 | 3,31 |
| — — 10 | 1,40 | 20,00 | 14,29 | 4,20 | 27,50 | 6,55 |
| — — 11 | 1,96 | 22,50 | 11,48 | 4,20 | 22,50 | 5,36 |
| — — 12 | 1,40 | 22,50 | 16,07 | 2,80 | 22,50 | 8,04 |
| — — 13 | 3,36 | 27,50 | 8,18 | 5,04 | 22,50 | 4,46 |
| — — 14 | 2,52 | 27,50 | 10,91 | 3,08 | 25,00 | 8,12 |
| — — 15 | 4,20 | 27,50 | 6,55 | 5,60 | 20,00 | 3,57 |
| — — 16 | 2,24 | 30,00 | 13,39 | 4,76 | 22,50 | 4,73 |
| Moyennes | 2,443 | 22,25 | 12,019 | 3,905 | 23,353 | 7,367 |
| Moyenne Fe/moyenne Mn | | | 9,108 | | | 5,980 |

Comparaison statistique des moyennes « germés » et « non germés » :

Mn : 2 fois 20 mesures ; F calculé = 9,29
Fe : — — F calculé = 0,70
Fe/Mn : — — F calculé = 7,28

F théorique : 5 p. 100 : 4,1 (S à 1 p. 100).
1 p. 100 : 7,4 (NS).
1 p. 1 000 : 13,0 (S à 5 p. 100).

Les données de ce tableau indiquent que les deux séries d'échantillons sont pauvres en Mo, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par BENNE *et al.* (1964) et, bien que les teneurs en Mo du grain provenant d'épis germés soient généralement plus faibles, on ne peut conclure à une différence significative entre les deux séries d'échantillons.

Pour obtenir une confirmation du rôle de l'acide β-indolacétique dans la germi-

nation prématurée du maïs, nous avons dosé cette auxine dans le grain, à trois stades de maturité : stade laiteux, début du stade pâteux et stade pâteux avancé, en utilisant la technique colorimétrique de POLEVOY (1959). Les résultats sont rapportés dans le tableau 6.

Les résultats indiquent que, le 2 septembre, il y avait effectivement plus d'acide β-indolacétique dans les grains provenant d'épis partiellement germés alors que le

TABLEAU 5

*Teneur en Mo de grains provenant d'épis mûris normalement et d'épis partiellement germés* (en mg/kg MS)

| N° des échantillons | Grains provenant d'épis mûris normalement | Grains provenant d'épis germés prématurément |
|---|---|---|
| 1 | 0,41 | 0,25 |
| 2 | 0,25 | traces |
| 3 | 0,19 | 0,13 |
| 4 | 0,16 | 0,32 |
| 5 | 1 | 0,39 |
| 6 | 0,39 | 0,25 |

20 août, on avait constaté le contraire. Il faut souligner la très grande difficulté du choix des échantillons car, au moment du prélèvement, rien ne prouve que l'épi apparemment normal, considéré de ce fait comme témoin, ne germera pas dans les jours qui suivent, puisque le phénomène se manifeste très précisément au moment du passage de l'état laiteux à l'état pâteux. L'évolution normale de l'acide β-indolacétique au cours de cette période correspond à une réduction progressive mais rapide des taux de cette auxine ; aussi, des différences peu importantes dans le développement existant normalement, même entre deux plantes voisines, peuvent-elles masquer le phénomène.

TABLEAU 6

*Évolution des taux d'acide β-indolacétique dans les grains normaux et dans les grains provenant d'épis partiellement germés*

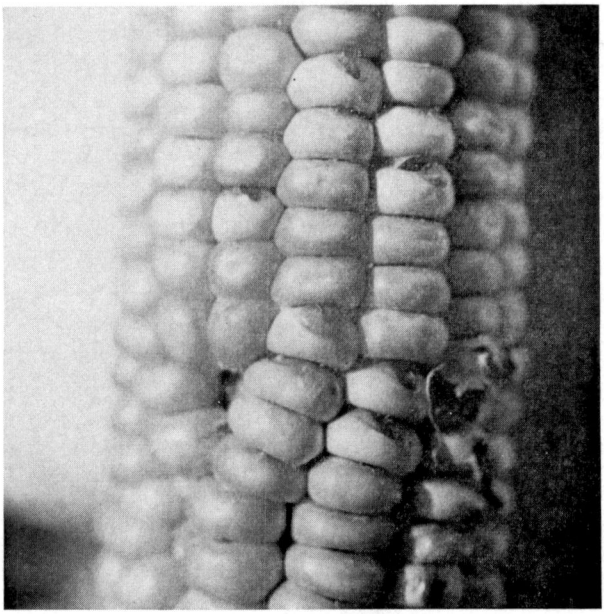
(en γ pour 1 000 grains)

| Dates des prélèvements | 20-8 | 2-9 | 15-9 |
|---|---|---|---|
| Grains mûrissant normalement . | 2 300 | 925 | 800 |
| Grains provenant d'épis partiellement germés ..... | 2 110 | 1 550 | 820 |

## 6. — *Essais de reproduction expérimentale de la germination prématurée*

Le but de cette expérience a été de confirmer qu'une teneur excessive en acide β-indolacétique, au moment du passage du grain de l'état laiteux à l'état pâteux, pouvait déclencher la germination.

Pour cela, nous avons injecté dans le pédoncule de 10 épis se trouvant au début du stade pâteux, 5 ml d'une solution d'acide β-indolacétique à 100 μg/cm³. Sept épis ont répondu positivement et l'un d'entre eux, dont nous reproduisons ci-dessous



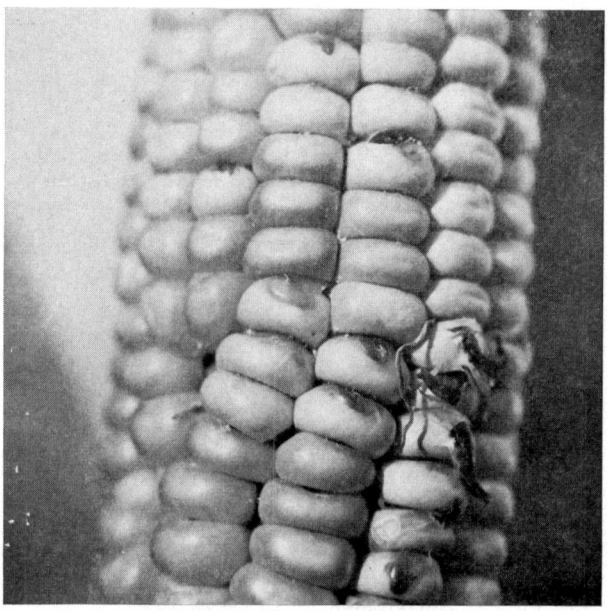


FIG. 2. — *Germination sur épi de grains immatures de maïs, provoquée expérimentalement par injection d'acide β-indol acétique*

la photographie, présentait 25 grains en cours de germination, alors que sur l'ensemble de la culture, il n'a pas été observé de germination prématurée. Une preuve indiscutable du rôle de l'acide β-indolacétique dans le phénomène étudié a été ainsi obtenue.

## CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Les différents résultats cités dans la précédente publication (ROUTCHENKO et SOYER, 1971), ainsi que ceux recueillis au cours de la présente étude conduisent aux conclusions suivantes :

— l'existence d'une prédisposition variétale, observée en culture, a été confirmée par les expériences portant sur le développement d'embryons excisés provenant de variétés, les unes réputées sensibles, les autres considérées comme relativement résistantes ;

— le Maïs sensible à la germination prématurée (*I. N. R. A. 260*) s'est montré moins tolérant qu'une variété résistante (*Funk's G, 266*) à l'égard d'un excès de manganèse ou d'une insuffisance en fer ;

— la même variété peut faire preuve d'une sensibilité différente vis-à-vis de la germination prématurée lorsqu'elle est cultivée dans des conditions de milieu différentes ;

— la prédisposition à la germination prématurée d'un grain de maïs se traduit par une perméabilité accrue des téguments et par des modifications biochimiques de sa composition ;

— dans les conditions étudiées, les grains d'apparence normale mais provenant d'épis partiellement germés sont plus riches en Mn et quelquefois en Fe que les grains prélevés dans un même peuplement, mais sur des épis mûris normalement ;

— dans les sols calcaires, les apports d'un mélange de micro-éléments comprenant notamment Fe, Mn, Mo, Co, Cu, Zn, réduisent considérablement le phénomène, alors qu'ils demeurent sans effet dans les sols sableux et acides ;

— les apports de Cu et de Zn n'exercent pas d'action protectrice vis-à-vis de la germination prématurée et l'aggravent dans certains cas ;

— les apports de fer sous forme de chélats, conjointement avec du Mn sous forme frittée, se comportent vis-à-vis de la germination prématurée, dans les sols expérimentés, de la même façon que le mélange de micro- éléments. Cependant, dans le cas des sols calcaires, leur action protectrice s'avère moins efficace que celle d'un apport du mélange de micro-éléments ;

— l'analyse physico-chimique du sol ne fournit pas d'indications précises qui permettraient d'établir une distinction entre le sol où le maïs germera sur plante et celui où il mûrira normalement bien que, dans 82 p. 100 des cas étudiés, une relation paraisse exister entre la manifestation du phénomène d'une part, les disponibilités en Fe et Mn du sol ou les facteurs susceptibles de modifier cette disponibilité d'autre part ;

— la germination sur plante de grains immatures de maïs peut être reproduite expérimentalement par injection d'une solution d'acide β-indolacétique dans le pédoncule, pratiquée au moment où le grain parvient au stade pâteux.

Pour que ces constatations permettent de reconstituer la succession des phénomènes qui, dans les conditions du milieu observé, aboutit à la germination sur plante de grains immatures de maïs, il est nécessaire de les rapprocher des données bibliographiques et de l'ensemble des observations réalisées au cours de notre étude.

Un grain de maïs germe sur plante, avant d'atteindre sa complète maturité, lorsque sa teneur en acide β-indolacétique normalement élevée au stade laiteux ne diminue pas au moment où il parvient au stade pâteux. La dégradation de l'acide β-indolacétique qui conduit à la formation d'un inhibiteur de la germination, nécessite une activité oxydasique adéquate, qui dépend pour une large part de l'activité du fer et du manganèse présents dans la graine.

Dans la dégradation de l'acide β-indolacétique par voie oxydative, le fer intervient sous sa forme oxydée alors que le manganèse doit se trouver sous sa forme réduite (STUTZ, 1957). Du fait que le potentiel du système $Fe^{+++} \leftrightarrows Fe^{++}$ ($^{0,75}$ V) est nettement inférieur à celui des différents systèmes susceptibles d'être formés par Mn ($MnO_2 \leftrightarrows MnO_4$ : 1,68 V ; $Mn^{++++} \leftrightarrows Mn^{+++}$ : 1,64 V ; $MnO_4 \leftrightarrows Mn^{++}$ : 1,52 V ; $MnO_2 \leftrightarrows Mn^{++}$ : 1,24 V), la proportion entre $Fe^{+++}$ et $Fe^{++}$ est commandée pour une large part par l'activité de Mn. Il en résulte que les variations du potentiel d'oxydo-réduction du sol sont en mesure d'affecter la forme de chacun de ces éléments de manière différente.

Ce fait explique les difficultés rencontrées au cours de la présente étude pour établir une relation entre la germination prématurée du maïs cultivé sur des calcaires argileux de Charente ayant des pH dépassant fréquemment 7,5 et les mêmes accidents survenant en sol sableux des Landes dont le pH se situe aux environs de 5. En faisant intervenir le potentiel d'oxydo-réduction, ce problème trouve une explication satisfaisante :

— en sol calcaire, les disponibilités en Fe et en Mn sont particulièrement faibles. Il suffit alors d'un léger déplacement du potentiel d'oxydo-réduction pour modifier la proportion entre ces éléments et provoquer la carence en l'un ou en l'autre. Les analyses du grain (tabl. 4) ont montré que le grain provenant d'épis germés était systématiquement plus riche en Mn que le grain d'épis prélevés dans le même peuplement, mais mûri normalement ;

— dans les sols des Landes, l'activité de Fe et de Mn est très élevée (en raison de leur origine et du pH) mais ces sols sont également particulièrement sensibles au régime hydrique, tant qu'un drainage efficace n'a pas été instauré. Le milieu réducteur, dû à la submersion ou seulement à une humidité excessive, peut accroître la mobilité relative de Mn, déjà très élevée en raison du pH, en l'espace de quelques heures (PEIVE, 1958).

On voit que, dans les deux cas, le phénomène qui conduit aux accidents peut être identique quant à sa nature ; simplement, il se déroulerait à des niveaux de Fe et de Mn différents.

L'intervention du potentiel d'oxydo-réduction permet d'expliquer également pourquoi la germination prématurée se manifeste principalement sur des défriches et peut disparaître, sans qu'aucun traitement spécifique n'ait été appliqué, après quelques années d'exploitation entraînant une amélioration de l'état cultural du sol et la régularisation de son régime hydrique.

Il se peut que d'autres facteurs que ceux dont nous avons mis le rôle en évidence

interviennent tant au niveau du sol que de la plante, étant donné la complexité du phénomène et le nombre considérable d'interactions susceptibles de se produire. Il nous manque aussi des connaissances fondamentales concernant les mécanismes d'intervention de Fe et de Mn dans l'activité des systèmes enzymatiques et des auxines responsables du déclenchement de la germination prématurée du maïs.

Ces conclusions posent le délicat problème des mesures qu'il conviendrait de prendre pour prévenir les accidents, car il apparaît que chaque sol doit être considéré comme un cas particulier, où il serait nécessaire d'étudier tout d'abord les disponibilités en Fe et en Mn ainsi que les conditions d'intervention de tous les facteurs susceptibles de modifier leur assimilabilité.

En ce qui concerne plus particulièrement le sud-ouest aquitain, on peut conseiller le chaulage des sols acides et un drainage efficace, alors que, dans les sols calcaires, en dehors de l'assainissement, on peut recommander des apports d'un mélange de micro-éléments comprenant notamment : Fe, Mn, Zn et Mo, éléments dont la disponibilité dans ces sols est nettement insuffisante.

*Reçu pour publication en février 1972.*

## SUMMARY

CAUSES OF THE GERMINATION OF IMMATURE MAIZE GRAINS ON THE PLANT

II. — ADDITIONAL PARTICULARS

Maize grains germinate on the plant before full ripeness if their heterauxin content, which is high, at the lacteal stage, does not decrease on becoming dough-like. Normal deterioration of heterauxin calls for an adequate oxidative activity that substantially depends on the relative activities of Fe and Mn in the grain. The changing oxidation-reduction potential of the soil affects differently the assimilability of Fe and Mn and alters their ratio in the plant.

The customary soil analysis does not yield sufficiently accurate data to discern clearly the soil where the maize will germinate and that where it will ripen normally.

The following steps are suggested to afford protection against such mishaps :

*a*) in *acid* soils, high in free Fe and active Mn : increasing the pH, and land improvement ;

*b*) in *limy* soils, input of trace elements in a non-oxidizable form and steady water control.

## ZUSAMMENFASSUNG

URSACHEN DER KEIMUNG AUF DER PFLANZE VON UNREIFEN SAATEN DES MAIS

I. — ERGANZENDE ERGEBNISSE

Das Maiskorn keimt auf der Pflanze vor vollständiger Reifung, wenn sein Gehalt an β-Indolessigsäure, der im milchigen Stadium entstanden ist, nicht in dem Augenblick abnimmt wo das Korn den teigigen Zustand erreicht hat. Der normale Abbau der β-Indolessigsäure erfordert eine angemessene oxydierende Tätigkeit, welche grösstenteils von Fe und Mn im Samenkorn abhängig ist. Die Aenderungen des Oxydoreduktionspotentials des Bodens beeinflussen verschiedenartig das Assimilationsvermögen von Fe und Mn und beeinflussen ihr Verhältniss in der Pflanze. Die übliche Analyse des Bodens ist nicht imstande, genügend präzise Anweisungen zu ergeben, um eine Unterscheidung zwischen dem Boden, wo der Mais auf der Pflanze keimen wird und jenem, wo er normal ausreifen wird, zu ermöglichen.

Die allgemein vorgeschlagenen Schutzmassnahmen gegen diese Missbildungen könnten wie folgt lauten :

— bei saueren, an freiem Fe und aktivem Mn reichen Böden : Erhöhung des pH und Sanierung des Bodens ;
— kalkhaltigen Böden : Zufuhr von Mikroelementen unter einer dieselben gegen Oxydierung schützenden Form und Regulierung der Wasserversorgung.

## РЕЗЮМЕ

Причины проростания на растении незрелых зерен кукурузы. Дополнительные данные.

В. РУТЧЕНКО, Ж. П. СУАЙЕ.

Зерна кукурузы проростают на растении до достижения полной зрелости, когда содержание β-индолуксусной кислоты, повышенное в них в период молочной спелости, не понижается при достижении периода спелости вязкой. Нормальная деградация β-индолуксусной кислоты требует соответственной окислительной активности, зависящей, в свою очередь, от окислительной активности Fe и Mn в зерне. Колебания окислительно-восстановительного потенциала почвы влияют различным образом на усвояемость Fe и Mn, и изменяют соотношение этих элементов в растении. Обычный анализ почвы неспособен дать достаточно точные указания, чтобы была возможность установить различия между почвами, на которых зерна кукурузы проростают на самом растении, и почвами, на которых зерно выспевает нормально.

Для защиты против проростания кукурузных зерен на растении можно рекомендовать следующие меры :

— На кислых почвах, содержащих много свободного железа и активный марганец-повышение pH и оздоровление почвы;

— На почвах известковых — внесение микроудобрений в неокисляющейся форме и регулирование водного режима;

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGUILAR A., 1969. Communication personnelle. *Estacion Experimental del Zaïdin*, Espagne.

ANDREENKO S. S., KOUPERMANN F. M., 1959. *Physiologie du maïs*. Édition Univ. Moscou, U. R. S. S.

BADIA J., 1971. Analyse factorielle faite sur notre demande. *C. N. R. F., Station de Biométrie*, Champenoux.

BENNE E. J., LINDEN E., GRIER J. D., SPIKE K., 1964. Composition de plantes de maïs à différents stades de végétation et accumulation, par acre, d'éléments nutritifs essentiels. *Quart. Bul. Mich. Agric. Exp. Sta.*, **47**, 1.

BENTON Jones J. Rr, 1970. Distribution of fifteen elements in corn leaves. *Soil Sci. Pl. Anal.*, **1** (1), 27-33.

JACOBSON, cité par CHAPMAN, 1969. *World Crops* (1964).

JANSSEN G., 1969. Biochemical studies on the resistance to premature sprouting in cereal seeds. *Acta Agric. Scandinavica*, **19**, 197-214.

PEIVE J., 1958. Soil condition and the effect of applying microfertilizers. Micro-éléments dans la production végétale. *Acad. Sci. Latvian*, S. S. S.R.

POLEVOY V. V., 1959. Dynamique de l'acide β-indol acétique dans le grain du maïs en cours de germination. *Dok. Akad. Nauk, S. S. S. R.*, **124**, 695-698.

ROUTCHENKO W., SOYER J. P., 1971. Sur les causes de la germination sur plante de grains immatures de maïs. *Ann. agron.*, **22**, 241-255.

SCHARRER K., JUND J., 1956. *Z. Pflanzenernäh. Düng. Bodenkunde*, **75**, 1.

STUTZ R. E., 1957. Cité par PILET P., dans *Phytohormones de croissance*, 1961, p. 513-514, 321-323.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 461-468.

# INFILTRATION ET DÉPLACEMENT D'UN TRACEUR LOCALISÉ DANS UN SOL NON SATURÉ. EFFET DE L'HUMIDITÉ INITIALE

Y. CLOUET*, A. FEODOROFF**, A. LIBOIS* et Suzanne MÉRIAUX*

**Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches, I. N. R. A.,*
*21 - Dijon*

***Station d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

RÉSUMÉ

Les expériences réalisées avec un matériau très poreux montrent que l'infiltration d'une pluie non saturante est la plus rapide avec l'humidité initiale la plus élevée. Il est vraisemblable que ce comportement est lié à l'existence d'une macroporosité très élevée dans le cas étudié ici.

L'entraînement d'un produit soluble localisé dans le sol est directement influencé par la profondeur atteinte par l'infiltration. Ici, à chaque instant, on trouve le traceur d'autant plus loin de son point de départ que le sol est initialement plus humide.

## I. — INTRODUCTION

Au cours de leur infiltration dans le sol, les pluies ont pour effet secondaire de mobiliser et d'entraîner en profondeur des corps susceptibles d'être mis en solution ou en suspension. Lorsqu'il s'agit d'engrais solubles tels que les nitrates, cet entraînement appauvrit en éléments fertilisants les couches de sol occupées par les racines et conduit à des pertes improductives. Le phénomène a été observé à maintes reprises et des études récentes conduites en plein champ (LIBOIS, 1968 ; CLOUET, 1970) ont montré que les modalités de l'entraînement sont influencées par les conditions climatiques, notamment par le rythme des pluies et l'état de dessèchement des sols. Le présent travail de laboratoire a pour objet d'examiner de façon plus précise qu'au champ le rôle qu'exerce sur le déplacement d'un traceur l'humidité initiale du sol.

Dans un travail antérieur, portant sur un sol artificiel, l'un de nous avait observé que la pluie simulée déplace l'eau pré-existante par un processus voisin de l'effet piston (FÉODOROFF et YARON, 1967). Toutefois, ce comportement était peut-être lié à la nature du matériau étudié ; c'est pourquoi des études complémentaires sur sols naturels s'avéraient nécessaires. Le présent travail est précisément une contribution à une meilleure connaissance de ce phénomène. Corrélativement il montre, sur un exemple concret, l'influence de l'humidité initiale du sol sur le processus même de l'infiltration. Cet aspect du problème n'a pas, à notre connaissance, été beaucoup étudié jusqu'à présent malgré son importance pour la résolution de questions agronomiques ou hydrologiques.

## II. — MÉTHODE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAUX

La méthode consiste à réaliser des colonnes de sol d'humidité uniforme et connue, avec un traceur chimique localisé dans les couches supérieures. La colonne est ensuite soumise à un arrosage d'intensité constante et connue. Pendant l'arrosage, on observe l'avancement du front d'humectation. Après un certain temps, on arrête l'arrosage et on détermine le profil hydrique et la teneur en traceur.

Le matériau utilisé est l'horizon de surface d'un sol brun calcique sur marne de la région de Dijon, prélevé à l'emplacement des observations *in situ* sur l'azote. Il a une texture argilo-limoneuse, avec 40 p. 100 d'argile, et un peu de calcaire. La capacité de rétention au champ, mesurée sur les « paliers » de teneur en eau constante est de 25 p. 100 en poids.

On s'est fixé comme objectif de réaliser un jeu de colonnes de sol à la capacité de rétention (ce qui correspond à l'état hydrique du sol pendant une grande partie de l'année) et un autre jeu à une humidité nettement plus faible, pour simuler un état de dessèchement estival.

Le sol est préalablement humidifié dans un plateau, puis introduit dans des tubes en verre, rétrécis à la base, de 60 cm de long sur 2 cm de diamètre. L'humidification est réalisée sur des prises de 17 g de terre sèche environ, en alternant les apports d'eau avec un malaxage d'homogénéisation. Chaque prise est ensuite introduite dans le tube de façon à occuper 8 cm de hauteur.

Pour chaque prise, le remplissage est bien homogène dans le cas du sol à la capacité de rétention qui se présente sous forme de petits grumeaux. Pour le sol plus sec, l'homogénéité a été plus difficile à obtenir, car les grumeaux sont de taille différente et plusieurs fois il a fallu recommencer le remplissage, car il apparaissait une stratification. Pour pallier cela, il a fallu malaxer beaucoup plus longtemps que dans le cas précédent et surtout faire très attention lors du remplissage. On touche ici à la limite de cette technique expérimentale. On a choisi une teneur en eau de 15 p. 100 en poids car au-dessous de cette limite, le mélange est trop hétérogène.

Chaque colonne est constituée par six prises, soit environ 100 g de terre sèche sur 48-50 cm de hauteur (fig. 1). On a ainsi un milieu très peu compact avec une densité apparente sèche de 0,66 et une porosité de 75 p. 100 en volume. La teneur en eau initiale exprimée en lame d'eau équivalente par cm de sol est 1,65 mm/cm avec la capacité de rétention et 1 mm/cm pour l'humidité plus faible.

Le traceur est placé dans les 8 cm supérieurs de la colonne, dont le sol est amené à la teneur en eau choisie par une solution de NaCl. Pour les deux jeux de colonnes, la quantité de chlore introduite est la même, soit 10 mg. La réserve en eau initiale constituée par la solution du traceur est donc 13 mm avec la capacité de rétention et 8 mm avec l'autre humidité initiale. Dans les deux cas, la concentration du chlore par rapport au sol est de 0,59 mg $Cl^-$/g terre sèche.

Le remplissage est effectué immédiatement avant l'arrosage de façon à éviter la diffusion du sel.

Après le remplissage, l'ouverture supérieure des colonnes est rapidement recouverte de coton et de billes de verre de 5 mm de diamètre, afin d'obtenir une répartition aussi homogène que possible de l'eau introduite et d'éviter les effets d'affouillements.

La pluie est simulée par un arrosage goutte à goutte alimenté par une allonge graduée située au-dessus de la colonne. L'eau utilisée était permutée. Le débit est règlé par des robinets de façon à obtenir une valeur voisine de 10 cm/h en lame d'eau équivalente : exactement 9,6 cm/h soit 1,6 mm/mn.

Pendant l'arrosage on note la position du front d'humectation. Les essais sont conduits en

trois répétitions pour chaque valeur de l'humidité initiale. Certaines colonnes sont sacrifiées en cours d'essai, le sol en est extrait par de l'air comprimé, et on détermine par tranche de 1 cm la teneur en eau (par sèchage à l'étuve) et la teneur en chlore (dosage par $AgNO_3$).

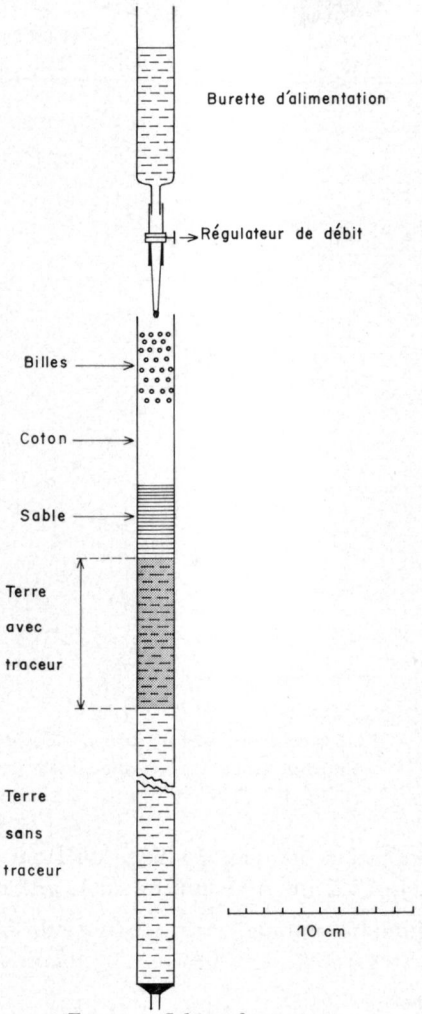



FIG. 1. — *Schéma du montage*

## III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. — *Progression du front*

L'observation de la figure 2 montre qu'après un stade d'établissement qui ne dure que quelques minutes, la courbe représentative de la position du front est une droite. Donc, pendant la majeure partie du processus observé, la vitesse du front est constante. On retrouve donc avec le sol initialement humide le même type

de comportement qu'avec le sol initialement sec (FÉODOROFF, 1965). La brièveté du stade d'établissement est vraisemblablement due à l'intensité élevée utilisée ici, ce qui rejoint également les observations relatives à un sol initialement sec.

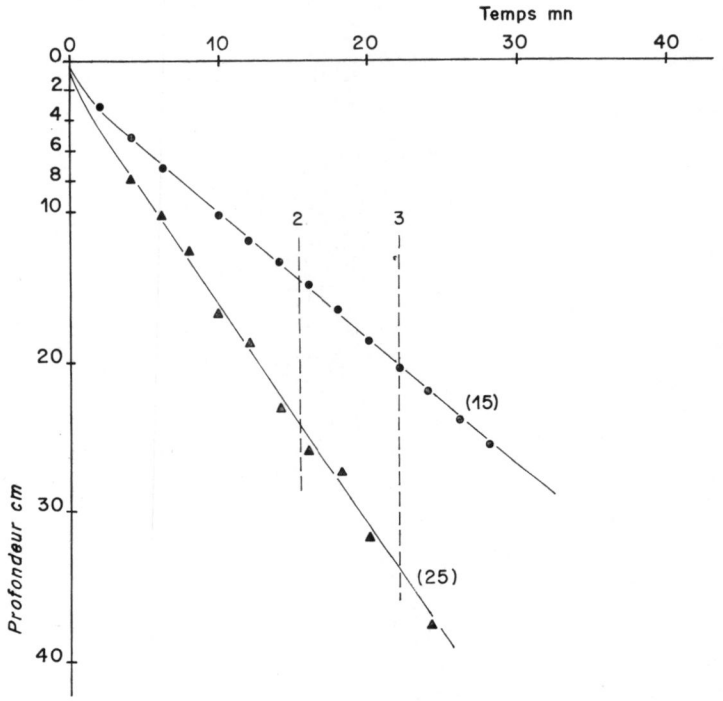



FIG. 2. — *Pénétration du front en fonction de l'humidité initiale*
En paramètre ( ) : Humidité initiale
2 et 3 : profils hydriques

La deuxième constatation est que la vitesse du front est fortement influencée par l'humidité initiale. Les valeurs déterminées sur le graphique sont les suivantes :

| (Humidité initiale) g/100 g | (Vitesse du front) cm/h |
|---|---|
| 15 | 51,3 |
| 25 | 85,3 |

Il apparaît donc que l'eau s'infiltre plus rapidement dans le sol le plus humide (à la capacité de rétention). Il convient toutefois de rappeler qu'on est en présence d'un matériau très poreux qui ne présente vraisemblablement pas d'obstacle à l'échappement de l'air.

### B. — *Profils hydriques*

Une première estimation de la teneur en eau moyenne après humectation du sol peut être obtenue en calculant la fraction de volume (taux de remplissage)

occupée par l'eau en mouvement et en ajoutant la valeur obtenue à l'humidité initiale.

Le taux de remplissage s'obtient par le rapport entre l'intensité de la pluie (I) et la vitesse d'avancement du front (V). Les valeurs calculées sont les suivantes :

| Humidité initiale % de poids | Taux de remplissage | | Humidité finale moyenne % poids |
|---|---|---|---|
| | en % de volume | en % de poids | |
| 15 | 19 | 28,8 | 43,8 |
| 25 | 12 | 18,2 | 43,2 |

Pour ce qui concerne le classement entre les deux humidités initiales, il apparaît que le taux de remplissage est plus élevé avec le sol initialement le plus sec. Ce fait, qui est bien entendu la conséquence directe d'une vitesse du front plus faible, a déjà été observé sur des essais en plein champ (FÉODOROFF, 1969).

Le calcul montre en outre que ce taux de remplissage plus élevé tend à compenser l'humidité initiale plus faible pour produire une teneur en eau finale moyenne quasiment identique pour les deux conditions d'humidité initiale.

L'observation des profils hydriques (fig. 3 et 4) confirme, en ordres de grandeur, ces premières estimations. En fait, l'humidité *moyenne* mesurée est quelque peu inférieure à celle calculée. Cela tient à deux faits :

— le calcul du taux de remplissage par la vitesse constante du front néglige le stade d'établissement à vitesse plus élevée et surestime donc la vraie valeur ;
— au cours de la détermination des profils hydriques, il est apparu que le « front » se présente comme une calotte sphérique tournée vers le bas. Le front tel qu'il apparaissait sur le contour de la colonne était donc quelque peu à l'amont d'un front « moyen ».

Si l'humidité finale *moyenne* est sensiblement identique dans les deux séries d'expériences, l'allure des profils hydriques est différente. Dans le cas de l'*humidité initiale relativement* faible, il apparaît une zone d'humectation (à humidité variable) très développée ; la zone de transmission est pratiquement inexistante pour un apport de 26 mm, et reste réduite avec l'apport de 36 mm. Par ailleurs, l'humidité en surface est élevée, plus grande qu'avec le sol initialement à capacité de rétention sans toutefois atteindre la saturation totale qui correspondrait à une teneur en eau de 114 p. 100 en poids.

Avec le sol *initialement à capacité de rétention*, les profils sont assez uniformes. La zone d'humectation est peu marquée. La teneur en eau en surface est relativement faible. Tout se passe comme si l'eau « glisse » mieux lorsque le sol est préalablement humecté. Toutefois, cette image ne doit pas faire penser à la goutte d'eau qui glisse sur une vitre. En effet, l'eau d'apport et l'eau préexistante s'interpénètrent, comme le montre le comportement du traceur.

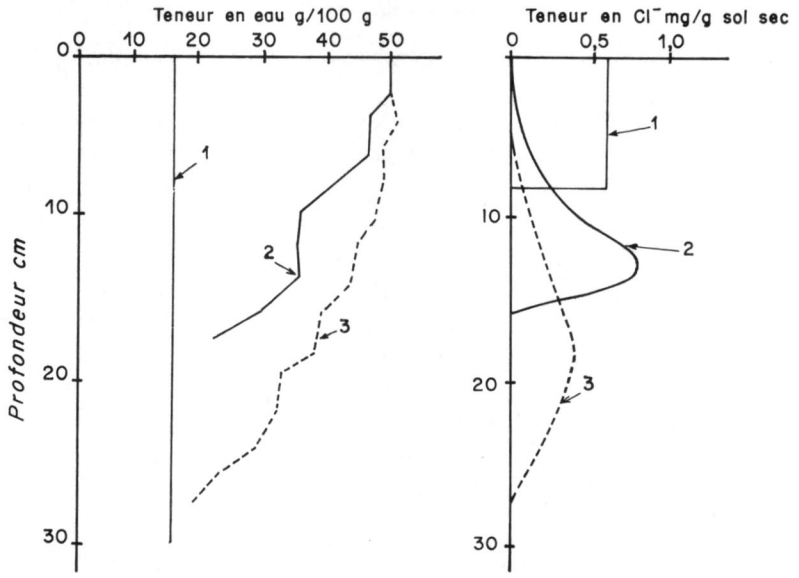



FIG. 3. — *Distribution de l'eau et du chlore*

1. — avant arrosage
2. — après apport de 26 mm
3. — — — — 36 mm

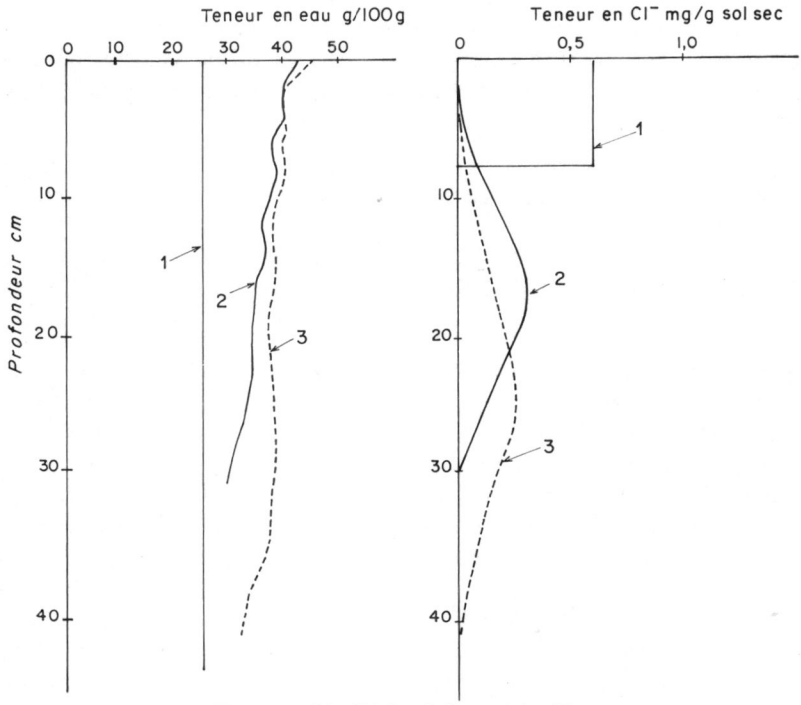



FIG. 4. — *Distribution de l'eau et du chlore*

1. — avant arrosage
2. — après apport de 26 mm
3. — — — — 36 mm

### C. — *Comportement du traceur*

Les figures 3 et 4 donnent les distributions successives du chlore rapporté au sol sec.

Ces résultats permettent de faire les constatations générales suivantes :

1. pour chaque profil hydrique, une partie de la solution a été déplacée jusqu'au niveau du front d'humectation ;
2. pour les apports d'eau considérés (minimum 26 mm), la solution a été presque totalement balayée des couches superficielles qui la contenaient initialement. Rappelons que la tranche de sol initialement humectée par la solution contenait 8 mm d'eau dans un cas (fig. 3) et 13 mm dans l'autre (fig. 4) ;
3. à l'amont du front, la distribution affecte l'allure d'une « vague » ;
4. la distribution du chlore est plus différenciée (amplitude de la « vague » plus grande) avec l'humidité initiale la plus faible ;
5. on note même dans un cas (fig. 3, courbe 2) un enrichissement du sol en chlore par rapport à sa teneur initiale.

## IV. — RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Ces expériences réalisées avec un matériau très poreux montrent que l'infiltration d'une pluie non saturante est la plus rapide avec l'humidité initiale la plus élevée. Il est vraisemblable que ce comportement est lié à l'existence d'une macroporosité très élevée dans le cas étudié ici.

L'entraînement d'un produit soluble localisé dans le sol est directement influencé par la profondeur atteinte par l'infiltration. Ici, à chaque instant, on trouve le traceur d'autant plus loin de son point de départ que le sol est initialement plus humide.

*Reçu pour publication en mars 1972.*


## SUMMARY

### INFILTRATION AND LEACHING OF A LOCATED TRACER IN AN UNSATURATED SOIL. EFFECT OF INITIAL MOISTURE CONTENT

The experiments, carried out with a highly porous material, show that the infiltration velocity of a non-saturating rainfall is higher with the higher initial content. This may be due to the fact that, in the soil studied, the porosity is considerable.

Displacement of a located soluble salt into the soil is directly affected by the depth of infiltration. In the soil under experience, the displacement of the salt, for the same water supply, is greater with the higher initial moisture content.

## ZUSAMMENFASSUNG

### VERSICKERUNG UND VERSETZUNG EINES IN EINEM NICHT GESÄTTIGTEN BODEN LOKALISIERTEN SPURELEMENTES WIRKUNG DER ANFANGSFEUCHTIGKEIT

Die Versuche, die mit Hilfe eines sehr porösen Materials durchgeführt wurden, zeigen, dass die Versickerung eines nicht sättigenden Regens am schnellsten ist bei höchster Anfangsfeuchtigkeit. Es ist wahrscheinlich, dass in dem hier untersuchten Fall dieses Verhalten) mit dem Vorhandensein einer sehr hohen Macro-Porosität verbunden ist.

Die Mitnahme eines im Boden lokalisierten, lösbaren Produktes wird unmittelbar durch die erreichte Tiefe der Versickerung beeinflusst. Hier findet man in jedem Augenblick das Spurelement um so weiter entfernt von seinem Ausgangspunkt als der Boden Anfänglich feuchter war.

## РЕЗЮМЕ

### Инфильтрация и передвижение метящего вещества заложенного в ненасыщенной почве. Влияние исходной влажности.

И. КЛУЕ, А. ФЕДОРОВ, А. ЛИБУА, С. МЕРИО.

Опыты, проведенные на сильно пористом материале, показывают, что при ненасыщающем дождевании, вода инфильтрируется наиболее скоро при наибольшей начальной влажности. Вероятно, что это связано с налинием очень крупной порозности в данной почве.

Вытеснение вглубь растворимого вещества, заложенного в почве, находится в прямой зависимости от глубины достигнутой инфильтрацией. В данном случае метящее вещество переносится тем глубже, чем выше исходная влажность.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


CLOUET Y., 1970. *Dynamique comparée de l'eau et de l'azote dans un sol brun argilo-limoneux sur marne de la région de Dijon.* Thèse 3e cycle, Dijon.

FÉODOROFF A., 1965. *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante.* Thèse, Paris.

FÉODOROFF A., YARON B., 1967. Expériences sur l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol préalablement humide. *Ann. agron.* **18**, 1, 5-15.

FÉODOROFF A., 1969. Infiltration et problèmes agronomiques. Quelques approches expérimentales. *La Houille Blanche*, n° 8, 869-884.

LIBOIS A., 1968. Dynamique de l'azote minéral en sol nu. *Ann. agron.*, **19**, 2, 103-128.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (4), 469-472.

# CHRONIQUE DES LIVRES

MAHIEUX (F.). — LE CALCUL DE LA RENTABILITÉ DE LA RECHERCHE. — Paris, Eyrolles, 1971, 104 p.

Les *Annales agronomiques* ont publié au cours du dernier trimestre 1971, un « Essai de programmation de la recherche » qui est une étude sur une méthode de sélection des thèmes de recherche. Au même moment est paru un ouvrage qui complétera utilement l'information des chercheurs qui se sont penchés directement sur le problème, et qui permettra à tous d'aborder de manière synthétique l'importante question de la sélection des projets de recherches.

L'ouvrage de F. MAHIEUX a le mérite de faire un tour d'horizon assez complet de ce qui existe en la matière, et de ce qui est actuellement utilisé au niveau des entreprises publiques et privées, tout en s'efforçant de présenter de manière critique les qualités et les inconvénients de ces méthodes.

L'ouvrage traite essentiellement de la sélection économique, il en résulte qu'une partie des objectifs, qui sont ceux d'un organisme tel que l'I. N. R. A., ne peut pas être appréciée suivant les critères présentés. En particulier les aspects fondamentaux des recherches dépendent plus d'une étude prospective que d'une sélection économique à relativement court terme.

L'étude présentée par F. MAHIEUX révèle que l'emploi des méthodes de sélection des projets est encore trop peu répandu en France, et que le nombre d'entreprises disposant d'un service spécialisé est très faible. Les services d'État seraient d'ailleurs les pionniers en la matière.

L'auteur, enfin, a raison d'attirer l'attention sur les difficultés d'ordre psycho-sociologique qui peuvent être rencontrées dans l'application des méthodes de sélection des projets.

J. M.

ARNON (I.). — CROP PRODUCTION IN DRY REGIONS. Vol. I : BLACKGROUND AND PRINCIPLES. — London, Leonard Hill, 1972, 650 p. (A plant science monograph, Coll. dir. by. N. Polunin).

Cet ouvrage traite de tous les aspects de la production végétale dans les régions sèches, y compris les zones arides où les récoltes ne sont pas possibles sans irrigation et les zones semi-arides dans lequelles les pluies, bien que rares, sont suffisantes pour certains types de cultures.

Son but est de donner une vue complète, concise et moderne des connaissances en ce domaine. L'auteur, chef du département d'agronomie au Volcani Institute, est spécialiste de ces questions et a fait la synthèse de nombreux travaux pour publier cet ouvrage.

En raison de l'ampleur du sujet, l'ouvrage est composé de 2 volumes. Ce premier volume traite de principes généraux et de pratiques culturales ; le second sera consacré à des cultures particulières.

Les cinq premiers chapitres sont consacrés aux climats arides, à leur répartition dans le monde et à leur influence sur les cultures ainsi qu'à l'agriculture traditionnelle dans ces régions.

Les chapitres 6 à 10 traitent des pratiques de l'irrigation et des rapports plante-eau du sol.

Deux chapitres sont ensuite consacrés à la fertilisation et un au travail du sol.

Les chapitres 14 et 15 traitent des densités de plantations et des systèmes culturaux adoptés (rotation, monoculture, cultures mixtes).

Trois chapitres passent en revue les affections et ennemis des plantes (mauvaises herbes, insectes, maladies).

Le dernier chapitre enfin traite de la promotion de l'agriculture dans les régions sèches.

PESSON (P.), éd. — LA VIE DANS LES SOLS. ASPECTS NOUVEAUX. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES. — Paris, Gauthier-Villars, 1971, 480 p., Collection « Géobiologie - Écologie - Aménagement », dirigée par C. Delamarre Debouteville.

Dans la préface où il présente cet ouvrage collectif, le professeur PESSON indique : « la lecture de la table des matières de cet ouvrage pourrait laisser croire qu'il s'agit d'un colloque entre spécialistes de la pédobiologie. Des aspects fort variés de la vie dans le sol y sont en effet exposés,

par des microbiologistes, un protistologue, des entomologistes, des zoologistes, certains étant de surcroît de vrais pédologues, et tous ayant pour préoccupation essentielle les aspects écologiques de la vie dans le sol.

En réalité le motif qui a suscité la participation de ces éminents spécialistes a été d'ordre pédagogique ; il s'agissait à l'origine d'une série de conférences données à titre d'information scientifique à des élèves de l'Institut national agronomique du 12 au 14 mai 1969. Peut-être n'est-il pas inutile d'expliquer sommairement ce qui nous avait conduit à un tel projet.

Titulaire de la Chaire de Zoologie à l'Institut national agronomique depuis vingt-cinq ans, nous avons assisté et participé à une évolution de l'enseignement de la zoologie...

... Pour l'agronome, il était traditionnel d'apprendre « en zoologie » les chapitres relatifs aux animaux nuisibles ou utiles, et la biologie ou la simple connaissance de ces formes innombrables dépassait déjà de beaucoup l'horaire disponible. Mais l'agronome moderne est moins un technicien qu'un ingénieur de conception. Il est plus important pour lui de comprendre pourquoi un insecte nuisible pullule et ravage une culture que de savoir de façon précise à quelle espèce il appartient... Depuis une dizaine d'années nous avions donc peu à peu orienté notre enseignement de zoologie à l'I. N. A. vers l'écologie, qui envisage les rapports entre les êtres vivants et leur milieu.

L'écologie est à la fois science d'analyse et de synthèse, et les problèmes qu'elle étudie nécessitent le plus souvent la collaboration de chercheurs spécialisés. C'est pourquoi chaque discipline agronomique ou scientifique enseignée à l'I. N. A, (bioclimatologie, agriculture, zootechnie, biologie végétale, biologie animale, etc.) contribue sous un aspect particulier à la formation écologique de l'agronome...

Si nous avons choisi cette année la thème « La vie dans le sol », c'est que le sujet était un de ceux pouvant intéresser au premier chef les agronomes. Le sol héberge en effet une telle diversité et une telle concentration de formes vivantes que celles-ci interviennent de façon primordiale dans l'élaboration, le maintien ou l'évolution de ses structures et de ses propriétés...

La part que peuvent jouer les divers représentants de la faune du sol, des Bactéries aux Protozoaires, des Microarthropodes aux Vers de terre, a été analysée avec des moyens de plus en plus perfectionnés. Les conditions de vie de ces microorganismes ou de ces invertébrés ont été étudiées expérimentalement. Une véritable discipline scientifique nouvelle est née, la Pédobiologie qui a nécessité d'abord la coopération de chercheurs spécialisés les uns en biologie, les autres en pédologie, et qui a conduit à la formation de chercheurs à la fois pédologues et biologistes...

Il ne pouvait certes être question de traiter tous les aspects d'un aussi vaste sujet, mais nous avons eu la chance de rencontrer parmi nos jeunes chercheurs orientés vers ces études, une gamme très variée de spécialistes. Nous avons plaisir à souligner à ce propos la qualité et l'originalité de leurs travaux, qui confèrent à notre pays, dans ce domaine de la pédobiologie, un rang international de choix...»

Sommaire de l'ouvrage :

G. Bachelier : La vie animale dans les sols :
I. — Détermination de la faune des sols,
II. — Action de la faune dans l'évolution des sols considérés en tant qu'équilibres naturels.

G. Vannier : I. — Techniques d'étude des populations des microarthropodes du sol,
II. — Exemple d'une étude écologique : les Microarthropodes et l'état hydrique du sol.

M. Pussard : Les Protozoaires du sol.

M. B.-Bouché : Relations entre les structures spatiales et fonctionnelles des écosystèmes illustrées par le rôle pédobiologique des vers de terre.

C. Jeanson : Étude expérimentale de l'action des vers de terre sur les sols artificiels.

P. Boyer : Les différents aspects de l'action des Termites sur les sols tropicaux.

Z. Massoud : Un élément caractéristique de la pédofaune : les Collemboles.

J. Rivière et M.-A. Chalvignac : La rhizosphère.

J. Keilling : Les activités enzymatiques du sol.

Y. Dommergues : Interrelations sans caractère symbiotique entre la végétation et la microflore du sol : « l'effet litière ».

ANHYDROUS AMMONIA. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM ON ASPECTS OF ITS TECHNOLOGY AND USE AS A FERTILIZER. — December 1970, National College of Agriculturel Engineering, Silsoe, Bedford. — Guilford (Surrey, England), I. P. C. Science and Technology Press, 1971, 128 p.

Ce symposium fait le point des différents aspects de la technologie et de l'utilisation de l'ammoniac anhydre.

Les Communications sont groupées sous les quatre sections suivantes :

— distribution et manipulation à la ferme,
— effets agronomiques,
— utilisation au champ,
— aspects économiques de son utilisation.

ROORDA VAN EYSINGA (J. P. N. L.), SMILDE (K. W.). — NUTRITIONAL DISORDERS IN GLASSHOUSE LETTUCE. — Wageningen, Centre for agricultural Publishing and Documentation, 1971, 56 p., 30 fig. en coul.

Ce manuel peut être utilisé pour diagnostiquer les maladies de carence ou les phénomènes toxiques chez la laitue, à l'aide des symptômes visibles et de l'analyse foliaire.

Des photographies en couleur, accompagnées de descriptions, montrent les symptômes des carences en azote, phosphore, potassium, magnésium, calcium, soufre, bore, cuivre, manganèse, molybdène, fer et zinc et les effets toxiques d'excès d'azote, bore, manganèse, zinc et aluminium.

Les conditions de nutrition minérale de la laitue et les méthodes de prévention de ces troubles de la nutrition sont rapidement exposées.

*Analyse de l'éd.*

SCHNELL (R.). — INTRODUCTION A LA PHYTOGÉOGRAPHIE DES PAYS TROPICAUX. LES PROBLÈMES GÉNÉRAUX. Vol. 1. LES FLORES. LES STRUCTURES. Vol. 2. LES MILIEUX. LES GROUPEMENTS VÉGÉTAUX. — Paris, Gauthier-Villars, vol. 1, 1970, 499 p. ; vol. 2, 1971, 452 p.

A part quelques rudérales et espèces de haute montagne, la flore tropicale est totalement différente de celle des pays tempérés, la différence se situant au niveau des taxons famille et genre. Les arbres y prédominent avec des lianes et les épiphytes et la flore y est très riche ; et cela d'autant plus que l'on se rapproche de l'équateur. On a dénombré 600 espèces d'arbres pour la seule forêt dense de la Côte-d'Ivoire. La limite entre la forêt dense tropicale et la savane est tranchée : c'est un mur élevé bornant le paysage ouvert de la savane et contre lequel viennent buter les flammes des incendies saisonniers sans pouvoir l'entamer.

L'ouvrage est divisé en quatre parties. La première, consacrée aux flores tropicales, met l'accent sur l'impossibilité pratique de dissémination des diaspores à grandes distances, ce qui pose un problème de l'origine des flores, car celles d'Afrique, d'Amérique et d'Indo-Malaisie présentent de profondes affinités. Des contacts anciens ont dû permettre des migrations de proche en proche entre ces ensembles floristiques. Diverses hypothèses sont discutées : morcellement d'une masse continentale primitive, isthmes intercontinentaux issus soit de plissements anciens soit de mouvements eustatiques, dérive des continents, migration des pôles, variation synchrone des climats sur l'ensemble du globe.

— La deuxième partie examine les structures et la biologie des plantes tropicales. Tous les aspects de la végétation y sont envisagés : les arbres à bases élargies en contreforts ailés, les racines aériennes, les épiphytes, la spinescence très marquée dans les caatingas du Brésil, les plantes myrmécophiles, les Podostémonacées des cours d'eau rapides à corps végétatif thalloïde. Une illustration abondante complète les descriptions.

— La troisième partie étudie les plantes dans leurs milieux. Une grande partie des régions tropicales est recouverte d'une carapace ferrugineuse très dure. On pense que la forte pluviosité élimine la silice des roches décomposées jusqu'au stade d'hydrates. Il semble que c'est le déboisement qui assure la constitution définitive de la cuirasse ferralitique par l'installation d'un climat à saison sèche marquée.

— La quatrième partie traite du dynamisme de la végétation. Les lambeaux forestiers existant en savane en représentent le climat mais les feux empêchent leur extension. Des chapitres sont consacrés à la végétation des montagnes tropicales, des steppes, des régions désertiques, de la mangrove.

Le texte est illustré de 289 figures ; les profils et transects des divers types de végétation sont souvent originaux de même que les photographies effectuées par l'auteur en Amérique tropicale, en Afrique, dans l'Asie du sud-est et les îles de la Sonde. 1 311 références bibliographiques sont classées en 27 rubriques à la fin des deux tomes. Il y a parfois des contradictions entre auteurs dues au fait que notre connaissance du monde tropical est encore en pleine élaboration.

F. P.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* : (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part.* Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Correction des épreuves :* les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

Agronomie.

*Le Directeur de la publication :* M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 9-1972.

*Dépôt légal : 3e trimestre 1972. N° d'impression : 1218*

# annales agronomiques

Bimestriel

1972

Vol. 23 . N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 479-496.

# LA POUSSÉE RADICULAIRE DÉTERMINATIONS, MÉCANISME, IMPLICATIONS

J. MORIZET et M. ROBELIN
avec la collaboration technique de Lucette LE BLEVENEC

*Station d'Agronomie,*
*Centres de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*63100 Clermont Ferrand*

## RÉSUMÉ

Les pressions obtenues par les techniques couramment utilisées pour mesurer les poussées radiculaires dépendent du temps nécessaire à l'établissement de la pression d'équilibre. Une nouvelle méthode de mesure est proposée qui ne présente pas cet inconvénient. Elle consiste à équilibrer rapidement la poussée radiculaire par contre-pression.

L'identité entre les valeurs ainsi mesurées de la poussée radiculaire et les différences de pression osmotique entre la sève et la solution nutritive confirme d'une façon directe qu'il est fondé d'expliquer, par la seule théorie osmotique, l'absorption hydrique responsable du phénomène d'exsudation.

En outre, les déterminations simultanées des poussées radiculaires et des débits permettent de calculer les résistances opposées par la racine à l'absorption de l'eau et les puissances mises en jeu dans cette absorption.

## INTRODUCTION

Les phénomènes d'exsudation de sève, conséquence de la poussée radiculaire, sont la preuve de l'existence de forces dont la racine est le siège et qui contribuent aux transferts de l'eau dans la plante.

Le type d'absorption qui en résulte, a été qualifié « d'actif » par RENNER (1912-1915), par opposition à l'absorption dite « passive », qui est la conséquence de phénomènes de succion, dans les vaisseaux du xylème, liés à la transpiration.

La première hypothèse pour rendre compte de l'absorption « active » a été de faire appel à un mécanisme osmotique. C'est ainsi que DUTROCHET (1835) considérait déjà que les cellules vivantes de l'extrémité des racines jouent le rôle d'une membrane hémiperméable placée entre deux solutions de concentration différente. Cette hypothèse n'a pas changé au cours du temps si ce n'est au sujet de la localisation de la

membrane, de mieux en mieux précisée à mesure que les connaissances en anatomie et physiologie progressaient ; cellules corticales pour ATKINS (1916), endoderme pour SCOTT et PRIESTLEY (1928).

Les recherches portaient parallèlement sur les mouvements de sels dans les racines pour expliquer les différences de pression osmotique observées (PRIESTLEY, 1922 ; VAN ANDEL, 1953 ; KRAMER, 1956).

Cependant, cette théorie osmotique ne permettait pas, selon certains auteurs, d'expliquer quantitativement les données expérimentales ; par exemple, l'arrêt du débit d'exsudation semblait se produire pour des différences de pressions osmotiques non nulles. L'existence de rythme dans l'exsudation ainsi que l'action des inhibiteurs métaboliques paraissent avoir également troublé quelques chercheurs. Ainsi, diverses hypothèses « vitalistes » étaient proposées à titre complémentaire ou à titre de substitution ; toutes admettaient l'utilisation de l'énergie libérée par voie catabolique dans la racine pour une sécrétion active de l'eau dans le xylème (URSPRUNG, 1929 ; SKOOG, BROYER et GROSSENBACHER, 1938 ; GROSSENBACHER, 1939 ; VAN OVERBEEKE, 1942 ; ROSENE, 1944 ; FRANCK et MAYER, 1947 ; HAGAN, 1949 ; BROYER, 1951).

Actuellement, il semble que la plupart des auteurs considèrent la théorie osmotique comme suffisante. Cependant, cette opinion nous paraît davantage fondée sur le manque de preuve de la théorie « vitaliste » que sur la démonstration directe que les phénomènes osmotiques sont seuls en cause (SLATYER, 1967).

Cette démonstration consisterait essentiellement à prouver l'égalité entre les différences de pressions osmotiques de part et d'autre de la zone d'absorption et les pressions d'exsudation à débit nul. A notre connaissance, une telle tentative n'a pas été réalisée ; les études du phénomène d'exsudation ont été faites soit à partir de la mesure des pressions racinaires seules (HALES, 1728 ; CLARK, 1874 ; WELLER, 1931 ; WHITE, 1938), soit à partir de mesures de débits et de pressions osmotiques (VAN OVERBEEK, 1942 ; BROYER, 1951 *a* ; ARISZ *et al.*, 1951).

En aucun cas, semble-t-il, pressions d'exsudation et différences de pressions osmotiques n'ont été mises en parallèle même lorsque les éléments de base étaient apparemment recueillis (VAADIA, 1960).

Ces considérations nous ont amenés à tenter la mise au point d'une technique permettant le contrôle de ces deux données, en attachant une importance particulière à la simultanéité des déterminations puisqu'il s'agit, en l'occurrence, d'un phénomène lié à la résultante de deux flux, flux salin et flux hydrique.

## I. — TECHNIQUES ET MATÉRIELS UTILISÉS

### 1. — *Mesure des poussées*

a) *Principe des mesures.*

Les déterminations de la poussée radiculaire effectuées sur l'exsudat de plantes décapitées se font, soit après arrêt prolongé de l'écoulement de la sève, soit par équilibrage rapide des poussées.

b) *Dispositifs de mesures.*

Deux techniques de mesures sont utilisées successivement (fig. 1).

*Dispositif A.* — La poussée radiculaire est mesurée par le manomètre métallique (m), l'écoulement de la sève ayant été bloqué par la fermeture de la pince de Mohr (p).

*Dispositif B.* — Le niveau de la sève dans le tube capillaire (tc) est stabilisé grâce à une contre-pression obtenue à l'aide d'une bouteille d'air comprimé (ba) ; la pression lue à cet instant sur le monodétendeur de précision (mdp) est égale à la poussée radiculaire transmise par la sève. Ce dispositif permet également, en l'absence de contre-pression d'équilibre, la détermination rapide du débit d'exsudation. On mesure alors la vitesse d'ascension de la sève dans le tube capillaire (tc) de section interne connue (1,75 mm²).

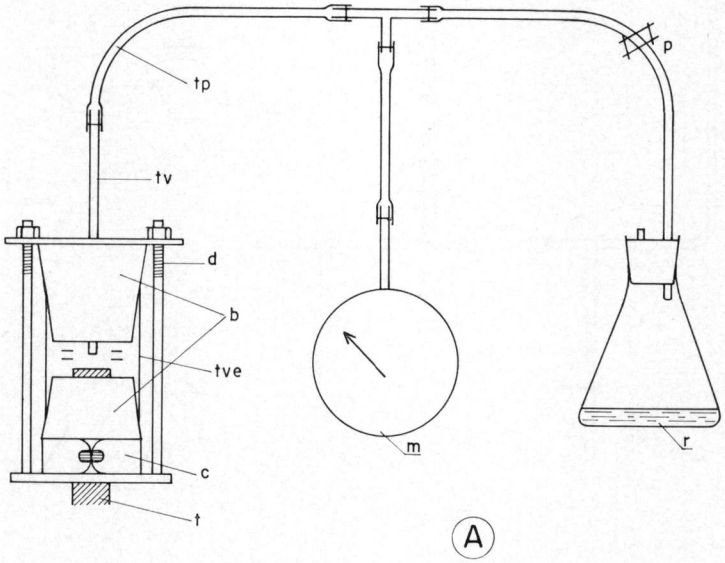



FIG. 1. — *Dispositifs de mesure de la poussée radiculaire*

A. — par arrêt prolongé de l'écoulement :

t : tige coupée
c : collier de serrage
b : bouchons de caoutchouc
tve : tube en verre épais
d : dispositif de serrage
tv : tube en verre
tp : tuyau en plastique
m : manomètre
p : pince de Mohr
r : recueil de l'exsudat

*Remarque. — Difficultés rencontrées.*

La connexion entre la tige coupée et le tuyau branché sur le manomètre s'est avérée d'une réalisation particulièrement délicate.

Il faut, en effet que soient remplies deux conditions :

— d'abord, la jonction doit être parfaitement étanche pour résister à des pressions élevées (de l'ordre de 3 kg/cm²), car la moindre fuite ôte toute signification aux mesures,
— ensuite, le dispositif utilisé ne doit pas écraser la tige, ni opposer un obstacle à la sortie de la sève.

Après de nombreux tâtonnements, la réalisation suivante nous a donné satisfaction (fig. 1).

Avant d'être coupée, la tige est d'abord enduite de graisse à robinets d'arrêt à l'endroit où se fera le raccord. Un bouchon en caoutchouc percé d'un trou d'une section légèrement plus faible que la section de la tige, est alors disposé sur celle-ci et maintenu en place par un collier de serrage. Ensuite, un tube en verre épais assure la liaison entre ce premier bouchon et un second permettant la jonction avec le tube plastique par l'intermédiaire d'un petit tube en verre. Cet ensemble est consolidé par un dispositif de serrage qui maintient les bouchons en place dans le tube en verre. Enfin, un second dispositif qui n'est pas représenté sur le schéma de la figure 1, prenant appui sur le vase de végétation, empêche la tige coupée de sortir du bouchon inférieur.

Les connexions à l'aval de cet ensemble sont réalisées à l'aide d'un tuyau plastique souple de faible diamètre et résistant bien aux pressions élevées.

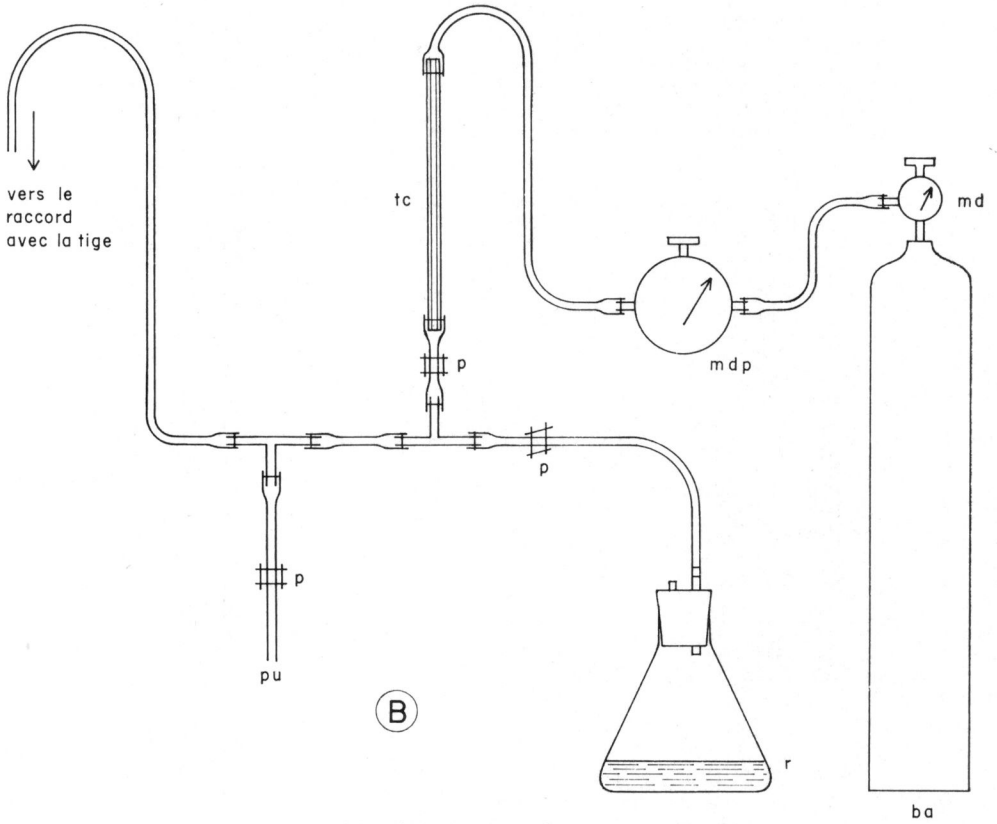



FIG. 1. — *Dispositifs de mesure de la poussée radiculaire*

B. — par équilibrage rapide des pressions :

ba : bouteille d'air comprimé
md : manodétendeur
mdp : manodétendeur de précision
tc : tube capillaire
p : pince de Mohr
pu : purge
r : recueil de l'exsudat

2. — *Mesures des pressions osmotiques de la sève*

a) *Principe.*

La méthode cryoscopique a été utilisée en prenant pour référence la technique préconisée par CURRIER (1944).

b) *Conditions de prélèvements.*

Pour satisfaire à la condition de simultanéité des mesures de pressions osmotiques de l'exsudat et des poussées radiculaires, les prélèvements de sève doivent « encadrer » dans le temps, aussi étroitement que possible, les déterminations de poussées. D'autres part, la durée de chaque prélèvement doit être assez longue pour permettre de recueillir un volume de sève suffisant pour les déterminations cryoscopiques (10 $cm^3$ environ). Cette double exigence nous a conduits à effectuer des prélèvements sur des périodes de 2 heures aux cours desquelles une ou deux déterminations de poussées radiculaires sont réalisées.

La simultanéité de telles mesures n'est pas très satisfaisante puisque, d'un côté, les données sont ponctuelles, et de l'autre, elles représentent une moyenne portant sur une période relativement longue. Cependant, les variations des poussées radiculaires se sont avérées suffisamment lentes et régulières pour que l'on puisse considérer qu'une ou deux déterminations pouvaient être représentatives de la période considérée.

3. — *Matériel végétal et conditions de culture*

Les plantes utilisées sont des tomates de variété *Marmande*. La culture est réalisée sur sable avec solution nutritive périodiquement recyclée, dont les caractéristiques sont les suivantes :
— en méq./l :

| Anions | | | Cations | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $NO_3^-$ | 5,0 | | $NH_4^+$ | 1,1 |
| | $PO_4^{--}$ | 1,1 | | $K^+$ | 3,6 |
| | $SO_4^{--}$ | 2,2 | | $Ca^{++}$ | 1,4 |
| | $Cl^-$ | 0,2 | | $Mg^{++}$ | 2,2 |
| | | | | $Na^+$ | 0,2 |

— oligoéléments,
— pH de la solution 6,2.

## II. — RÉSULTATS

### 1. — *Mesures de la poussée radiculaire après arrêt prolongé de l'écoulement de l'exsudat*

Cette technique reproduit les conditions expérimentales utilisées par la plupart des auteurs. Bien que nous ne l'ayons pas retenue par la suite, nous pensons devoir la mentionner brièvement pour faire la critique des résultats ainsi obtenus.

Elle consiste à mesurer la pression de la sève après arrêt de l'écoulement de l'exsudat.

Les courbes des pressions obtenues présentent les caractéristiques suivantes (fig. 2) :

— la pression initialement nulle, monte rapidement à partir du moment où l'écoulement est arrêté,

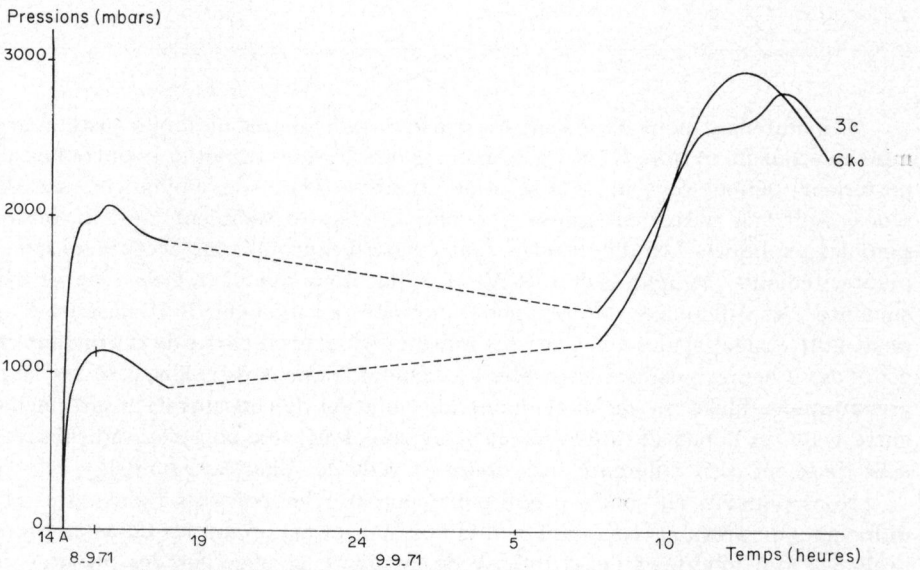



FIG. 2. — *Montée de la pression après arrêt de l'écoulement de la sève et évolution ultérieure*
A = arrêt de l'écoulement

— puis elle atteint, au bout d'un temps généralement compris entre 1 heure et 2 heures, un palier ou un maximum, suivant le moment de la journée où la manipulation est conduite ;

— ensuite, au cours de l'après-midi, la pression décroît pour passer par un minimum au cours de la nuit (aucune mesure n'ayant été effectuée durant cette période, nous ne pouvons préciser davantage),

— le lendemain, un nouveau maximum apparaît vers le milieu de la journée.

Ainsi, nous observons ce rythme journalier déjà signalé par VAADIA (1960) et qui est analogue au rythme des débits d'exsudation.

Si nous comparons les pressions osmotiques des exsudats recueillis au cours de la période de deux heures qui a immédiatement suivi la remise en écoulement libre (II) aux exsudats de plantes-témoins n'ayant pas été mises sous pression (IV), nous constatons, comme on pouvait le présumer, que l'annulation du débit de sève entraîne une augmentation importante des concentrations :

| | Tomates ayant servi aux mesures de pression | | | Plantes témoins | |
|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | IV | V |
| | Poussées radiculaires juste avant la mise en écoulement libre | Pressions osmotiques des exudats (mbar) | Différences de pressions osmotiques entre l'exsudat et la sol. nutritive (mbar) | Pressions osmotiques des exsudats (mbar) | Différences de pressions osmotiques entre l'exsudat et la sol. nutritive (mbar) |
| Plantes A | 2 200 | 1 500 | 1 100 | 920 | 520 |
| Plantes B | 2 200 | 1 300 | 900 | 920 | 520 |

Si maintenant nous observons les poussées radiculaires mesurées juste avant la mise en écoulement libre (I) et les différences de pressions osmotiques entre l'exsudat postérieur (période de 2 h) et la solution nutritive (III), nous voyons que ces différences sont très nettement inférieures aux poussées et semblent ainsi insuffisantes pour les expliquer. Les divergences sont encore beaucoup plus accentuées avec les plantes-témoins (comparaison I et V). L'explication qui peut être avancée est la suivante : les différences de pressions osmotiques au moment de la mise en écoulement libre étaient égales aux poussées radiculaires, mais à partir de cet instant et au cours des 2 heures pendant lesquelles les exsudats étaient recueillis, la sève s'est progressivement diluée. Le mélange donne une solution de concentration intermédiaire entre celle du début de prélèvement (correspondant aux poussées radiculaires) et celle de la fin (peu différente sans doute de celle des plantes-témoins).

Nous pouvons en conclure que pour comparer les poussées radiculaires et les différences de pressions osmotiques, il faut éviter au maximum les mises en pression prolongée qui modifient l'état interne de la plante et effectuer des mesures aussi simultanées que possible de ces deux grandeurs.

## 2. — *Mesures par équilibrage rapide des poussées*

### 2. 1. *Précautions expérimentales.*

Dès que l'on soumet la sève qui sort de la tige coupée à une pression, même faible, des déformations se produisent non seulement dans les connexions souples mais aussi, à un degré moindre cependant, dans la plante elle-même. Elles entraînent, dans un premier temps, l'abaissement du niveau de la sève dans le tube capillaire. Après cette réaction initiale dont la durée est de quelques secondes, deux cas peuvent se présenter :

— si la contre-pression exercée est supérieure à la poussée radiculaire, le niveau de la sève continue à descendre indiquant que le débit de la sève de positif avant le traitement est devenu négatif après (changement du sens de l'écoulement) ;

— si la contre-pression est égale à la poussée radiculaire, le niveau se stabilise pendant un temps variable suivant les essais (de l'ordre de 1 minute environ) avant que la sève ne s'écoule à nouveau de la tige, comme nous le verrons par la suite.

Le problème est de déterminer rapidement cette contre-pression d'équilibre avant que le traitement ainsi imposé n'entraîne des modifications dans la concentration de la sève. L'expérience nous a montré que le meilleur moyen d'opérer et le plus rapide était d'utiliser d'abord une contre-pression un peu plus élevée (d'environ 100 g/cm²) que la poussée radiculaire et ensuite de la réduire jusqu'au moment où le niveau de la sève se stabilise dans le tube capillaire. Cette façon d'opérer est plus satisfaisante que de procéder par montée progressive de la contre-pression qui exige des tâtonnements beaucoup plus longs sans que l'on soit certain de bien repérer la contre-pression d'équilibre.

### 2. 2. *Sources d'erreur systématique.*

a) *Non instantanéité des mesures.*

On peut se demander puisque la mesure de la poussée radiculaire n'est pas absolument instantanée, s'il n'y a pas une différence systématique entre la valeur ainsi observée et celle existant au moment exact de l'arrêt d'exsudation.

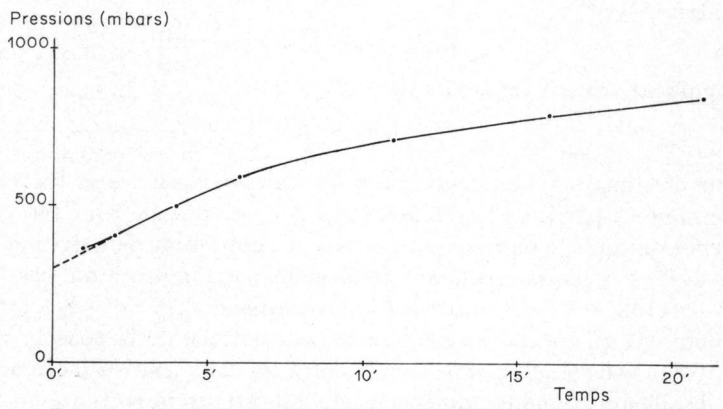



FIG. 3. — *Courbe de pressions obtenue en équilibrant à chaque instant la poussée radiculaire par contre pression* (débit nul)

Pour répondre à cette question, il serait intéressant de pouvoir déterminer l'équation de la courbe des poussées radiculaires à débit nul, déduite d'un modèle physique de l'absorption hydrique, susceptible de rendre compte des résultats expérimentaux d'une façon satisfaisante. Un tel modèle a été proposé par ARISZ *et al.* (1951). Cependant, il est apparu une certaine divergence entre les données calculées à partir de cette théorie et les mesures que nous avons effectuées rendant impossible l'application de ce modèle pour nos conditions expérimentales (fig. 3).

L'allure très souvent linéaire des courbes : pressions à débit nul en fonction du temps, tout au moins dans leur partie initiale, nous incite à effectuer une extrapolation graphique au temps $t = 0$. Les valeurs extrapolées sont inférieures d'environ 50 g/cm² aux valeurs mesurées. Cette surestimation s'explique :

— d'une part par la non instantanéité des mesures (de 30 à 60 secondes),

— d'autre part, par l'application, durant la même période, d'une pression supérieure à la pression d'équilibre.

b) *Débit non nul au cours de mesure.*

Lorsque la plante est soumise à une contre-pression d'équilibre, une certaine dilatation se produit dans le système et un débit nul apparent peut résulter d'une compensation volumique de cette dilatation et d'un débit d'absorption réel faible.

La non instantanéité des mesures nous conduit à une légère surestimation de la pression d'équilibre. Au contraire, le phénomène d'augmentation du volume des vaisseaux de la plante lié à la mise en pression, serait à l'origine d'une sous-estimation des valeurs mesurées puisque le débit d'absorption réel n'est pas rigoureusement nul. Il ne nous paraît donc pas opportun de corriger la pression déterminée, sur la base de l'extrapolation des courbes expérimentales alors que nous ne disposons d'aucun moyen de correction de l'erreur systématique opposée.

2. 3. *Comparaison des poussées radiculaires et des différences de pressions osmotiques entre l'exsudat et la solution nutritive* (fig. 4).

La relation linéaire d'ajustement entre les différences de pressions osmotiques des milieux interne et externe $\pi_i - \pi_e$ et les poussées radiculaires $p$ mesurées par équilibrage rapide :

$$\pi_i - \pi_e = 0{,}987\ p + 17{,}4 \qquad (1)$$

n'est pas significativement différente de :

$$\pi_i - \pi_e = p \qquad (2)$$

L'erreur d'estimation (différence entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées) déterminée à partir de la relation (1) a pour écart-type $\sigma = 100$ g/cm². Elle est assez élevée puisqu'elle représente 15 p. 100 de l'amplitude de variation des variables testées ; elle s'explique cependant totalement par l'imprécision des déterminations de $\pi_i - \pi_e$ ($\Delta\theta = +2 \times 0{,}01$°C, ce qui correspond à $\Delta\pi = +250$ g/cm²).

Nous noterons qu'aucune surestimation systématique de la poussée radiculaire n'apparaît. Il y a sans doute compensation entre les deux sources d'erreur discutées plus haut. D'ailleurs, si nous admettions qu'une erreur importante pouvait être commise sur $p$, elle ne pourrait être qu'une surestimation, compte tenu de l'allure

des courbes de variation de $p$ à débit nul. Ceci donnerait des différences $\pi_i - \pi_e$ plus élevées que les poussées radiculaires et donc largement suffisantes pour expliquer ces dernières.

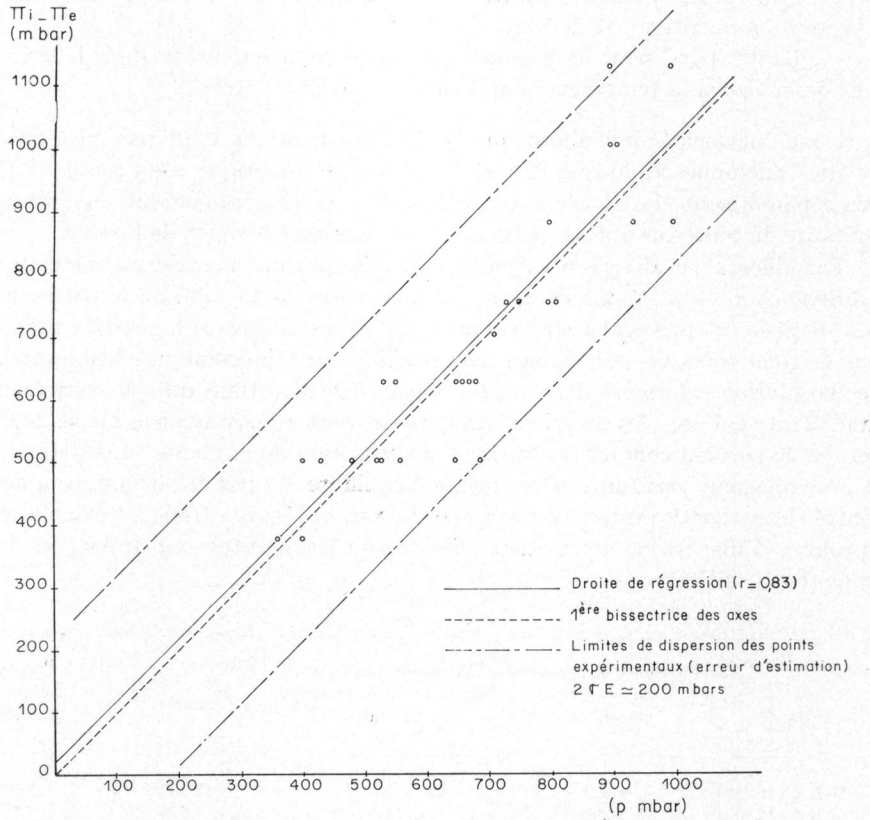



FIG. 4. — *Relation entre la poussée radiculaire* (p) (équilibrage rapide) *et la différence de pressions osmotiques existant entre l'exsudat* ($\pi_i$) *et la solution extérieure* ($\pi e$) (cryoscopie)

## III. — DISCUSSIONS

La mesure de la poussée radiculaire par contre-pression d'équilibre permet de confronter les données expérimentales avec les théories de l'absorption hydrique pour la plante. Elle autorise, en outre, le calcul des paramètres qui déterminent la valeur des débits d'exsudats.

### 1. — *Théorie osmotique de l'absorption hydrique. Quelques « anomalies »*

L'identité entre les valeurs mesurées de la poussée radiculaire et les différences de pressions osmotiques confirme, d'une façon directe, la théorie osmotique de l'absorption « active » de l'eau dans les plantes.

Au cours de nos essais, nous avons relevé, cependant, deux circonstances pour lesquelles l'égalité $\pi_i - \pi_e = p$ était déplacée vers l'inégalité $\pi_i - \pi_e > p$.

Le phénomène se produit :

— d'une part, systématiquement, dans les heures qui suivent le remplacement de la solution nutritive par de l'eau distillée,

— d'autre part, pour les mesures effectuées immédiatement après le sectionnement de la tige si la température ambiante est basse ($< 14°C$).

Nous noterons tout d'abord que la théorie osmotique n'est pas mise en échec par ces « anomalies » puisque la seule composante osmotique n'est pas plus faible, mais apparemment plus élevée que la valeur de la poussée radiculaire représentant la résultante de toutes les forces qui concourent à assurer le débit de la sève.

Par ailleurs, ces divergences sont explicables par une mauvaise appréciation de la différence $\pi_i - \pi_e$. Dans le cas du remplacement de la solution nutritive par de l'eau distillée, $\pi_e$ pris égal à zéro, est sans doute sous-estimé car la pression osmotique dans la zone corticale des racines ne s'équilibre certainement pas instantanément avec la solution extérieure. Par contre, $\pi_i$ peut être surestimé après le sectionnement d'une plante entière ; les premiers exsudats peuvent ne pas avoir la même composition que la sève au contact des surfaces d'absorption de la racine (endoderme). Ceci est probablement vrai tant qu'un régime d'équilibre n'a pas été atteint, comme l'ont montré HODGES et VAADIA (1964 *a* et *b*) et RANEY et VAADIA (1965) et comme semble le prouver la disparition de ces anomalies lorsque les mesures sont prolongées dans le temps (tabl. suivant) :

| | Pressions osmotiques de la sève $\pi_i$ (mbar) | Pressions osmotiques de la solution nutritive $\pi_e$ (mbar) | $\pi_i - \pi_e$ (mbar) | Poussée radiculaire $p$ (mbar) |
|---|---|---|---|---|
| 10 h -11 h 15 | 1 625 | 375 | 1 250 | 700 |
| 11 h 15-14 h | 1 200 | — | 825 | 750 |
| 14 h-16 h | 1 000 | — | 625 | 600 |
| 16 h-18 h | 920 | — | 545 | 500 |

### 2. — *Sécrétion saline*

Le maintien d'une différence de pression osmotique entre les milieux interne et externe, en phase d'exsudation, suppose l'existence d'un travail de concentration saline qui compense la dilution résultant de la circulation de la sève.

Théoriquement, les mouvements des sels pourraient se faire :

— soit en circuit fermé dans la racine. Dans ce cas, il faudrait imaginer que, quelque part dans les vaisseaux du xylème, en aval de la zone d'absorption de l'eau, ses cellules prélèvent une partie des sels contenus dans la sève. Ceux-ci seraient ramenés ensuite, par un cheminement extérieur, jusqu'à la zone d'absorption où s'effectuerait à nouveau leur sécrétion dans les vaisseaux conducteurs ;

— soit par prélèvement dans la rhizosphère.

La première hypothèse est à rejeter car elle impliquerait l'existence de poussées radiculaires supérieures aux différences des pressions osmotiques, ce qui n'est pas le cas dans nos expériences.

La seconde est confirmée par les données expérimentales. En effet, quand on remplace la solution nutritive par de l'eau distillée, on observe que les valeurs de pression obtenues après arrêt prolongé de l'écoulement s'élèvent peu au-dessus de celles mesurées par contre-pression, alors que de grandes différences apparaissent en présence de solution nutritive (fig. 5). Dans ce dernier cas, l'accroissement de la poussée radiculaire, lors de l'arrêt de l'écoulement de la sève, s'explique par la persistance de la sécrétion saline, et donc l'augmentation de la pression osmotique interne. Au contraire, quand les racines sont plongées dans de l'eau pure, l'absorption saline n'étant plus assurée, la poussée radiculaire reste constante même si l'on annule le débit de la sève.

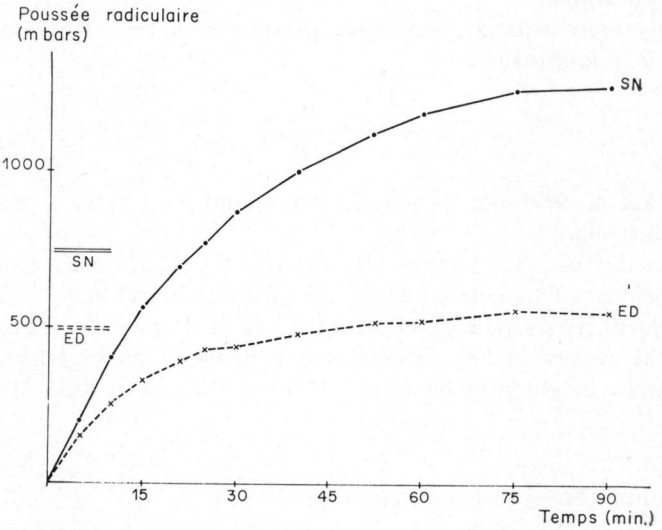



FIG. 5. — *Montée de la pression après arrêt prolongé de l'écoulement pour une plante placée: sur solution nutritive* (SN) *ou sur eau distillée* (ED).
Comparaison avec les poussées radiculaires initiales mesurées par équilibrage rapide

SN ═══
ED ═ ═ ═

Il faut cependant admettre qu'il existe, après la décapitation de la plante placée sur eau distillée, un certain lessivage des sels dans les cellules de la racine situées sur le cheminement de l'eau, en amont des surfaces d'absorption.

STEWARD *et al.* (1942) ont montré que les sels accumulés dans les vacuoles, en condition d'alimentation minérale satisfaisante, pouvaient être remis en circulation dans le cytoplasme si la plante était placée dans un milieu carencé. Le drainage minéral qui en résulte permettrait d'alimenter la sève en solutés et expliquerait la persistance de l'exsudation pendant plusieurs jours.

### 3. — *Les débits d'exsudation sous la dépendance de deux paramètres, résistance et puissance d'absorption*

Le débit d'exsudation résulte simultanément de la différence de pressions osmotiques (équivalente à la poussée radiculaire mesurée par contre-pression d'équilibre) et des résistances R rencontrées par la sève au cours de son transit dans la racine, jusqu'à la surface d'exsudation.

$$D = \frac{\pi_i - \pi_e}{R} = \frac{p}{R} \tag{3}$$

— D représente ici le débit global du système correspondant en régime d'équilibre, à l'absorption par toute la surface radiculaire,
— R est la résistance de l'ensemble du système et non la résistance par unité de surface d'absorption.

D'une façon plus générale, quand des pressions de nature osmotique ne sont pas seules en cause, il faut écrire :

$$D = \frac{\Delta\psi}{R} \tag{4}$$

$\Delta\psi$ représentant la différence de potentiel hydrique total entre le milieu intérieur et le milieu extérieur.

Il est possible par exemple, de faire varier $\Delta\psi$ par pression mécanique comme nous le verrons dans l'application numérique proposée plus loin.

Pour vaincre les résistances, et assurer le débit d'exsudation, une puissance $\mathcal{P}$ est utilisée. Elle représente l'énergie dépensée pendant l'unité de temps par la masse d'eau D qui passe du potentiel du milieu extérieur à celui du milieu intérieur.

$$\mathcal{P} = D \cdot \Delta\psi \tag{5}$$

Si l'on rapproche les équations (4) et (5), il vient

$$D = \sqrt{\frac{\mathcal{P}}{R}} \tag{6}$$

Ainsi, la valeur du débit d'exsudation dépend de deux paramètres :

— la résistance R,

— la puissance $\mathcal{P}$ qui, en régime d'écoulement continu, représente une fraction de la puissance d'origine catabolique, utilisée pour l'absorption des sels à contre-gradient (et éventuellement de l'énergie fournie par pression mécanique ou par dépression).

Les déterminations du débit et de la poussée radiculaire permettent de calculer ces paramètres.

A titre d'exemple, nous traiterons le problème de l'évolution de la résistance au transfert et de la puissance mise en jeu, en fonction de la valeur des pressions mécaniques exercées sur l'exsudat.

Cinq contre-pressions ont été successivement opposées à la sortie de la sève et chacune d'elle maintenue constante au cours de l'expérience. Les débits ont été notés en fonction du temps depuis le début du traitement ($t = 0$) jusqu'à l'établissement d'un nouveau régime permanent qui est atteint au bout d'un temps d'autant plus long que la contre-pression $p_c$ est plus élevée (fig. 6). Lorsque le débit est constant, une mesure de poussée radiculaire est réalisée (par la technique habituelle d'équilibrage rapide des poussées). De cette façon, nous disposons pour chaque traitement du couple : débit de la sève D — poussée radiculaire $p$.

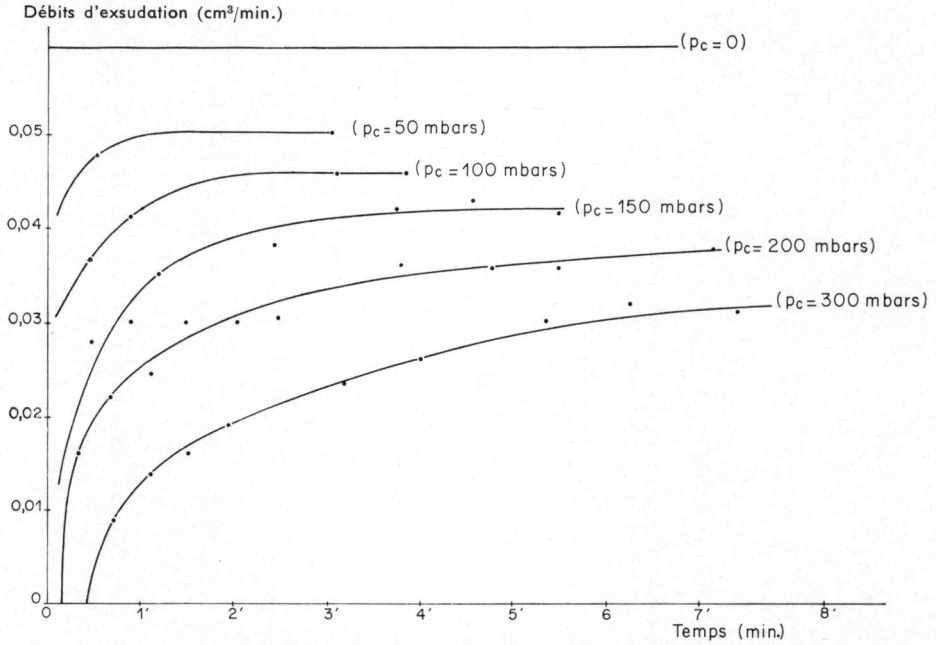



FIG. 6. — *Courbes des débits d'exsudation après mise sous pression constante de la sève à la sortie de la tige coupée*

La résistance R et la puissance d'absorption hydrique $\mathcal{P}$ sont calculées en appliquant les relations (4) et (5) au cas particulier de la manipulation :

$$R = \frac{p - p_c}{D} \tag{7}$$

$$\mathcal{P} = D\,(p - p_c) \tag{8}$$

Les résultats consignés au tableau I montrent que la diminution des débits qui se manifeste au fur et à mesure qu'une contre-pression plus élevée s'oppose à la sortie de la sève, résulte de la décroissance de la puissance mise en jeu. Par contre, la résistance reste à peu près constante.

Ce phénomène doit se produire la nuit lorsque la plante, stomates fermés et pleine turgescence atteinte, développe, par la résistance de ses tissus, une contre-pression s'opposant à la poussée osmotique.

TABLEAU I

*Calcul des résistances R et des puissances d'absorption hydrique $\mathcal{P}$ pour différentes valeurs de contre-pression $p_c$*

| Contre-pression imposée à la plante $p_c$ (mbar) | Débit à l'équilibre D ($cm^3\ min.^{-1}$) | Poussée radiculaire $p = \pi_i - \pi_e$ (mbar) | Diff. de pot. tot. entre la sève et la solution nutritive $\pi_i - \pi_e - p_c$ (m bar) | Résistance R (mbar · mn · $cm^{-3}$) | Puissance d'absorption $\mathcal{P}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | (bar · $cm^3$ · $mn^{-1}$) | $erg/s^{-1}$ |
| 0 | 0,059 | 310 | 310 | $5,3 \times 10^3$ | 18,3 | 305 |
| 50 | 0,050 | 335 | 285 | $5,7 \times 10^3$ | 14,2 | 237 |
| 100 | 0,046 | 350 | 250 | $5,4 \times 10^3$ | 11,5 | 192 |
| 150 | 0,042 | 390 | 240 | $5,7 \times 10^3$ | 10,1 | 168 |
| 200 | 0,037 5 | 420 | 220 | $5,9 \times 10^3$ | 8,2 | 137 |
| 300 | 0,031 | 480 | 180 | $5,8 \times 10^3$ | 5,6 | 94 |

## IV. — CONCLUSIONS

Nous avons montré que si l'on veut comparer les valeurs des poussées radicu laires aux différences de pressions osmotiques entre la sève et le milieu nutritif et déterminer les paramètres responsables de l'exsudation, les mesures de pression de la sève doivent se faire d'une façon aussi rapide que possible.

La technique par équilibrage rapide des poussées nous a, à cet égard, donné satisfaction.

La méthode, par mesure de la poussée radiculaire après arrêt prolongé de l'exsudation ne peut avoir la même signification. En effet, les fortes pressions auxquelles la plante est soumise sur une longue période, entraînent des modifications importantes de l'état osmotique de la sève. On peut suggérer seulement que la pression équilibre, atteinte au bout d'un temps plus ou moins long et reflétant la concentration saline maximum à laquelle la plante parvient quand l'exsudation est arrêtée, représente une certaine potentialité d'absorption saline.

La confirmation directe de la théorie osmotique nous amène à nous interroger sur l'exactitude de l'adjectif utilisé par RENNER pour qualifier le type d'absorption hydrique responsable de l'exsudation. En réalité, il s'agit d'un phénomène purement physique dans lequel la circulation de l'eau a lieu passivement sous l'action d'un gradient de potentiel essentiellement d'origine osmotique. Par contre, quand la plante est entière, la transpiration peut entraîner l'existence d'une pression mécanique négative dans les vaisseaux conducteurs du bois, qui ajoute ses effets à ceux de la pression osmotique pour déterminer le débit d'absorption dans un milieu nutritif de potentiel hydrique donné.

Dans ces conditions, il nous semble qu'il serait souhaitable de parler non pas d'absorption active et passive, mais plutôt d'absorption par gradient osmotique et par succion.

Il n'en reste pas moins vrai qu'une fourniture énergétique a lieu au niveau de la racine, qui concourt à la circulation de l'eau dans la plante mais d'une façon indirecte, puisque ceci est réalisé par l'intermédiaire du transport des ions qui constitue le seul transfert véritablement actif. On explique ainsi facilement l'action des inhibiteurs métaboliques sur l'absorption par gradient osmotique (CRAFTS et BROYER, 1938 ; LUNDEGARDH, 1950 ; BROYER, 1951 *b* ; VAN ANDEL, 1953).

Nous avons vu, d'autre part, que la détermination de la poussée radiculaire telle que nous l'avons effectuée, permet de calculer la résistance opposée par la racine à l'absorption hydrique et la puissance mise en jeu par cette dernière. La connaissance de ces paramètres permettra de se faire une idée plus précise des mécanismes de réaction de la plante aux variations des conditions minérales ou hydriques du milieu nutritif. Nous pensons qu'il serait intéressant par cette technique, de mieux définir l'action des carences azotées et potassiques décrites par MINGEAU (1969 et à paraître).

Il n'est pas impossible d'ailleurs, que de telles études contribuent à nuancer l'importance relative des deux types d'absorption par succion et par gradient osmotique. Jusqu'à présent, le premier constituait pour la majorité des auteurs, l'élément prépondérant et presque exclusif de l'absorption ; BARRS (1966) a cependant fait état

de données expérimentales qui laisseraient à penser que les pressions radiculaires jouent un rôle non négligeable. Si tel est le cas, elles assurent les reprises de turgescence nocturne, mais elles contribuent aussi aux transferts hydriques au cours de la journée.

*Reçu pour publication en mai 1972.*

## SUMMARY

ROOT PRESSURE. MEASUREMENT, MECHANISM, IMPLICATIONS

The pressures, commonly derived to measure the root pressure, depend on the time required to reach the balance pressure. A new method of measurement, set out herein does away with this shortcoming. It consists in applying back pressure to balance promptly the root pressure.

The selfsameness values of the root pressure so measured and the osmotic-pressure differences between the sap and the nutrient-solutions corroborate directly by purely osmotic considerations explain the water absorption accounting for the exudation phenomenon is warranted.

Furthermore, concurrent measurements of the root pressure of the sap and the flow rates enable to compute the root resistance to water absorption and the forces thus involved.

## ZUSAMMENFASSUNG

DER WURZELDRUCK BESTIMMUNGEN, MECHANISMUS, ANWENDUNGEN

Die mit den herkömmlichen Techniken ermittelten Drucke der Wurzeldrucke hängen von der zur Herstellung eines Gleichgewichtsdruckes erforderlichen Zeit ab. Eine neue Messmethode wird vorgeschlagen, die diesen Nachteil nicht aufweist. Hier wird der Wurzeldruck schnell durch einen Gegendruck ausgeglichen.

Die Übereinstimmung der so gemessenen Werte des Wurzeldruckes und der Druckunterschiede der osmotischen Drucke des Pflanzensafts und der Nährlösung, bestätigt unmittelbar, dass man mit Recht lediglich mit der Theorie der Osmose die Wasseraufnahme als verantwortlich für die Ausschwitzungserscheinungen erklärt.

Ausserdem ermöglicht die gleichzeitige Ermittlung des Wurzeldrucks und der Durchsätze die Berechung des Wurzelwiderstandes zur Wasseraufnahme und der bei dieser Aufnahme eingesetzten Kräfte.

## РЕЗЮМЕ

О корневом давлении. Определения. — Механизм. — Взаимосвязи.

Ж. МОРИЗЕ, М. РОБЕЛИН.

Давления, полученные обычными измерительными методами, зависят от времени, нужного для установления давления равновесия. Предлагается новый метод измерения который не имеет этого недостатка. Он состоит в быстром установлении равновесия корневого давления с помощью противодавления.

Идентичность так измеренных величин корневого давления и различий осмотического давления между соком и питательным раствором утверждает, что можно объяснить поглощение воды, ответственное за явление корневых выделений, с помощью одной осмотической теории.

Кроме того, одновременные определения корневых давлений и потоков позволяют сделать расчёт сопротивления корня поглощению воды и сил которые учавствуют в этом поглощении.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


VAN ANDEL O. M., 1953. The influence of salts on the exudation of tomato plants. *Acta Bot. neerl.*, **2**, 445-521.

ARISZ W. H., HELDER R. J., VAN NIE R., 1951.Analysis of the exudation process in tomato plants. *Journ. of Exper. Botan.*, **2**, 6, 257-297.

ATKINS W. R., 1916. *Some recent researches in plant physiology*. London. Whitaker et Co.

BARRS H. D., 1966. Root pressure and leaf water potential. *Science*, **152**, 1266-1268.

BROYER T. C., 1951 *a*. Experiments on imbitition and other factors concerned in the water relations of plant tissues. *Amer. J. Bot.*, **38**, 485-495.

BROYER T. C., 1951 *b*. Exudation studies on the water relations of plants. *Amer. J. Bot.*, **38**, 157-162.

CLARK W. S., 1874. The circulation of sap in plants. *Mass. State Board Agric. Ann. Rep.*, **21**, 159-204.

CRAFTS A. S., BROYER T. L., 1938. Migration of salts and water into xylem of the roots of higher plants. *Amer. J. Bot.*, **25**, 529-535.

CURRIER H. B., 1944. Cryoscopy of amounts of expressed tissue sap. *Plant Physiol.*, **19**, 544-550.

DUTROCHET M.-H., 1837. *Mémoire pour servir à l'histoire atomique et physiologique des végétaux et des animaux*. Vol. I XXX, 576 pp. Libr. de l'Acad. royale de Méd. de Paris.

EATON F. M., 1943. The osmotic and vitalistic interpretations of exudation. *Amer. J. Bot.*, **30**, 663-674.

FRANK J., MAYER J. E., 1947. An osmotic diffusion pump. *Arch. of Biochem.*, **14**, 197-313.

GROSSENBACKER K. A., 1939. Autonomic cycle of rate of exudation of plants. *Amer. J. Bot.*, **26**, 107-109.

HALES S., 1727. *Vegetable Staticks*. London : W. et J. Innys T. Woodward.

HAGAN R. M., 1949. Autonomic diurnal cycles in the water relations of nonexuding detopped root systems. *Plant Physiol.*, **24**, 441-454.

HODGES T. K., VAADIA Y., 1964. Uptake and transport of radiochloride and tritiaded water by various zones of anion roots of different chloride status. *Pl. Physiol. Lancaster*, **39**, 104-108.

HODGES T. K., VAADIA Y., 1964. Chloride uptake and transport in roots of different salt status. *Pl. Physiol. Lancaster*, **39**, 109-114.

KRAMER P. J., 1956. Physical and Physiological aspects of water obsorption. *Encyclop. Plant Physiol.*, **3**, 124-159.

LUNDEGARDH H., 1950. The translocation of salts and water trough wheat roots. *Physiol. Plantarum* (Copenhague), **3**, 103-151.

MERWIN H. E., LYON H., 1909. Sap pressure in the birch stem. *Bot. Gaz.*, **48**, 442-458.

MINGEAU M., 1969. Action de la nutrition minérale sur l'économie de l'eau dans la plante. I. Équilibre, absorption, transpiration. *Ann. agron.*, **20** (3), 263-276.

MINGEAU M., ROBELIN M., 1972. Le transfert de l'eau dans la plante. Action particulière de la nutrition azotée. *Ann. agron.*, **23** (4) 419-427.

VAN OVERBEEK J., 1942. Water uptake by excised root systems of the tomato due to non osmotic forces. *Amer. J. Bot.*, **29**, 677-682.

PRIESLEY J. H., 1922. Further observations upon the mechanism of root pressure. *New Phytologist*, **21**, 41-48.

RANEY F., VAADIA Y., 1965. Dispersion of THO and $^{36}$Cl uptake by sunflower root systems. *Physiologia Pla.*, **18**, 8-14.

RENNER O., 1912. Versuche zur Mecanik der Wasserversorgung. *Ber. dtsch. Bot. Ges.*, **30**, 576-580, 642-648.

RENNER O., 1915. Die Wasserversorgung der Planzen. In *Handworterbuch der Natur wissenschaften*, bd 10, 538-557.

ROSENE H. F., 1944. Effect of cyanide on rate of exudation in exiced onion roots. *Amer. J. Bot.*, **31**, 172-174.

ROSENE H. F., 1947. Reversible azide inhibition of oxygen consumption and water transfert in root tissue. *J. Cell. a comp. Physiol.*, **30**, 15-30.

SCOTT L. T., PRIESTLEY H. J., 1928. A reconsideration of the entry of water and salts in the absorbing region. *New Phytologist*, **27**, 125-140.

SKOOG F., BROKER T. C., GROSSENBACHER K. A., 1938. Effects of auxin on rates, periodicity, and osmotic relations in exudation. *Amer. J. Bot.*, **25**, 749-759.

SLATYER R. O., 1967. *Plant water relationships*. Academic Press London and New York, p. 210.

STEWARD F. C., PREVOST P., HARRISON J. A., 1942. Absorption and accumulation of rubidium bromide by barley plants. Localization in the root of cation accumulation and of transfer to the shoot. *Pl. Physiol.*, **17**, 411.

URSPRUNG A., 1929. The osmotic quantities of the plant cell. *International Cong. Plant Sci. Proc.*, **2**, 1081-1094.

VAADIA Y., 1960. Autonomic diurnal fluctuations in rate of exudation and root pressure of decapited sunflower plants. *Physiol. Plant*, **13**, 701-717.

WELLER D. M., 1931. Root pressure and root pressure liquids of the sugar cane plant. *Hawaiian Planters Rec.*, **35**, 349-382.

WHITE P. R., 1938. « Root-pressure », an unappreciated force in sap movement. *Amer. J. Bot.*, **25**, 223-227.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 497-515.

# RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS DES SOLS ET L'ABSORPTION DU STRONTIUM PAR UNE CULTURE DE RAY-GRASS EN SOLS CALCAIRES

R. GUENNELON, A. CONESA et A. M. de COCKBORNE

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,*
*84140 Montfavet*

## RÉSUMÉ

Une étude portant sur une cinquantaine de sols montre la difficulté de relier le coefficient de distribution du strontium entre un sol et une solution de contact à des propriétés physico-chimiques de ce sol ; en particulier, la capacité d'échange ne peut servir seule de critère; la teneur du sol en strontium soluble semble jouer un rôle important.

Le strontium total absorbé est une fonction croissante du rapport strontium échangeable/capacité d'échange, mais des variations du taux d'absorption ne sont sensibles que pour de forts apports de strontium facilement soluble.

Un apport de strontium marqué juste avant la culture se traduit par un taux de contamination qui ne dépend que de la capacité d'échange du sol : il lui est inversement porportionnel au moins durant les huit semaines qu'a duré la culture. Là encore, la réduction du taux de contamination ne peut être obtenue que par une modification positive de la capacité d'échange, mais la quantité de matériel (argile, matière organique) qu'il faudrait apporter est, sur le plan pratique, beaucoup trop importante. Un certain effet peut cependant être prévu en sols sableux, ayant une CEC très faible.

## I. — INTRODUCTION

De nombreux travaux ont porté sur la pénétration du strontium dans les végétaux, surtout depuis 1945, lorsque cet élément s'est avéré, sous la forme de l'isotope 90, un radio-contaminant dangereux.

Ces études ont été menées sous deux angles différents ; elles ont porté, d'une part sur le pouvoir de décontamination des sols vis-à-vis des solutions polluées que l'on projetait de rejeter, d'autre part sur les relations sol-plante dans des sols contaminés ou en voie de contamination.

L'antagonisme Sr/Ca avait fait antérieurement l'objet des recherches de HASEL-

HOFF (1893), de Mac HARGUE (1919) et de WALSH (1945), entre autres. Plus récemment, MENZEL (1954), EPSTEIN et LEGGET (1954), utilisant le strontium radioactif, étudièrent les relations entre l'absorption de cet élément et le taux de Ca ou de K échangeable.

Une bibliographie, très abondante, rassemblant les travaux sur $^{90}Sr$ dans les sols et sur le rôle de Sr dans la nutrition de la plante, a été publiée par le Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden (1960-1969).

Remarquant que ces travaux se réfèrent, en général, aux sols non calcaires, nous avons décidé d'étudier comparativement divers sols, dont la teneur en $CaCO^3$ varie de 0 à 80 p. 100. A cette étude, ont été ajoutés quelques sols acides, mais ayant reçu des apports de calcium assurant à la plante une fourniture suffisante en cet élément.

Le but de ce travail était de rechercher la possibilité, au travers d'analyses simples, de définir le comportement probable de ces sols en cas de pollution et de prévoir les conséquences pour les végétaux cultivés quant au niveau de contamination.

## II. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Les sols utilisés sont caractérisés par leur analyse granulométrique, leur pH, leur teneur en calcaire actif (DROUINEAU, 1942), leur capacité d'échange à l'ion $NH_4$, leur teneur en matières organiques totales, leur strontium échangeable par percolation à l'acétate d'ammonium. Le strontium total et le soufre total ont été dosés par fluorescence X.

Pour les cultures de ray-grass, utilisé comme plante-test, des pots en plastique sont remplis de 400 g de sol mélangé à 500 g de sables grossiers (environ 1,5 mm). On apporte, dans tous les pots de culture, les éléments majeurs et mineurs sous forme de solutions. Après séchage et homogénéisation, on ajoute 5 ml d'une solution de $Sr(NO_3)_2$ contenant, par litre, 10 microcuries de $^{90}Sr$ et 100 mg de Sr entraîneur. On homogénéise à nouveau ; le semis de ray-grass est effectué et les graines sont recouvertes d'une couche de sable de 0,5 mm d'épaisseur ; au moyen d'un petit tube de verre enfoncé dans le pot, on ramène, chaque jour, par pesée, le matériel sol + sable, aux 2/3 de sa capacité de rétention. Le semis ayant eu lieu le 31 août, deux coupes ont été effectuées respectivement les 28 septembre et 19 octobre. Chaque essai a été répété quatre fois.

Sur les parties aériennes, on dose K par spectrophotométrie d'émission, Ca et Sr par absorption atomique. Le strontium radioactif est mesuré sur un poids déterminé de matières sèches ; l'étalonnage est réalisé par référence à une gamme établie à l'aide de la solution de contamination et de matière végétale provenant de ray-grass non contaminé.

Le comptage est effectué dans des coupelles en acier inoxydable de 87 mm de diamètre, au moyen d'un compteur à gaz argon-méthane, dans un spectromètre bêta à bas bruit de fond (durée de comptage : 4 fois 15 minutes).

Les principaux résultats figurent dans les tableaux 1, 2 et 3.

## III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le premier travail a été de chercher à relier les propriétés physico-chimiques des sols étudiés à un coefficient global tenant compte de la répartition du strontium entre le sol et une phase liquide ; en second lieu, on a tenté de relier le strontium total absorbé par la plante à divers caractères du sol. On a enfin recherché le facteur influençant le plus l'absorption du strontium radioactif incorporé au sol.

A. — *Propriétés physico-chimiques des sols et coefficient de distribution*

Le coefficient de distribution d'un sol vis-à-vis d'une solution marquée en équilibre avec ce sol est :

$$K_d = \frac{\text{Activité par g de sol}}{\text{Activité par ml de solution}}$$

Ce coefficient a été étudié par Mc HENRY (1958) qui travaillait sur un sol calcaire grossier de type Sierozem contenant 1,5 p. 100 de $CaCO^3$, 11,5 p. 1 000 d'argile et présentait une capacité d'échange de 5,9 meq/100 g.

Utilisant une technique analogue à celle décrite par cet auteur, nous avons mis en contact pendant 24 heures, avec agitations intermittentes, 4 g de sol avec 25 ml de solution contenant 0,06 $\times$ $10^{-3}$ meq de strontium, marqué au $^{90}Sr$.

Cette quantité, correspondant à 1,5 $\times$ $10^{-3}$ meq/100 g de sol, est inférieure à la valeur maximale proposée par Mc HENRY (*loc. cit.*), (1 p. 1 000 de la capacité d'échange), à l'exception des échantillons 41 et 45 dont les C.E.C. sont très faibles. On mesure l'activité de la solution sur une partie aliquote et l'on calcule le rapport $K_d$.

Aucune relation satisfaisante ne relie ce coefficient aux divers paramètres envisagés isolément ou conjointement, qu'il s'agisse de $K_d$ déterminé sur un sol non traité ou sur un sol saturé au préalable par $Ca^{++}$ (tabl. 1 et 2).

Sur cinq sols, Mc HENRY avait déjà noté que $K_d$ ne présentait aucune corrélation évidente avec la capacité d'échange.

Plusieurs phénomènes contribuent à expliquer cette divergence :

*a*) lorsque le sol est riche en strontium facilement soluble, la quantité adsorbée par la phase solide n'est pas seulement fonction de la C.E.C. mais dépend également de la modification de la concentration de la solution due à la solubilisation de Sr du sol ;

*b*) dans ce cas encore, outre les phénomènes d'adsorption, il faut considérer la dilution isotopique avec Sr déjà adsorbé, qui, contribuant à faire baisser l'activité de la solution, augmente la valeur de $K_d$ ;

*c*) la fixation de Sr sur le sol est non seulement réalisée au niveau des colloïdes argileux, mais également au niveau de la matière organique. Or, la capacité d'échange totale, déterminée à l'aide de l'ion $NH_4$, ne correspond pas au pouvoir de sorption du sol vis-à-vis de Sr, au profit duquel joue le pouvoir « chélatant » de la matière organique (MORTENSEN et MARCUSIU, 1963).

La seule considération de la capacité d'échange ne peut donc permettre de prévoir le coefficient de distribution d'un sol.

Par ailleurs, NISHITA et TAYLOR (1964) ont montré qu'une fraction de Sr appliqué à un sol est adsorbée d'une manière telle qu'il n'est plus susceptible de participer à l'échange isotopique ; plus récemment, TAYLOR (1968) constate, comme SCHULZ et *al.* (1958, 1961) et comme ROBERTS et MENZEL (1961), que près de 50 p. 100 de $^{90}Sr$ introduit dans les sols par les retombées, n'est plus échangeable.

Il conclut que, l'équilibre isotopique avec de telles fractions non facilement échangeables n'étant atteint qu'au bout de 6 à 8 semaines, les méthodes d'extraction

TABLEAU I

*Caractéristiques physico-chimiques des sols* (1re série) *et coefficients de distribution*

| | Résultats en p. 1 000 | | | | | Résultats en p.p.m. | | | méq./100 g | Coefficients de distribution $K_d$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | Argile | Limon | Matières organiques | Calcaire actif | S total | Sr total | Sr échang. | E CEC | sans prétraitement | avec prétraitement |
| 2 | 7,8 | 190 | 485 | 46 | 15 | 1 670 | 190 | 23 | 16,3 | 161 | 80 |
| 3 | 8 | 215 | 380 | 37 | 110 | 260 | 610 | 30 | 14,5 | 248 | 186 |
| 4 | 8,3 | 185 | 405 | 26 | 115 | 1 140 | 840 | 99 | 12,8 | 243 | 106 |
| 5 | 8 | 125 | 180 | 29 | tr. | 50 | 100 | 14 | 11,4 | 220 | 248 |
| 6 | 8,1 | 170 | 465 | 31 | 20 | 420 | 140 | 13 | 10 | 110 | 128 |
| 7 | 8,3 | 15 | 65 | 10 | 30 | 60 | 350 | 14 | 2 | 54 | 44 |
| 8 | 8,2 | 115 | 175 | 24 | 85 | 80 | 250 | 6 | 8 | 292 | 160 |
| 9 | 7,5 | 210 | 210 | 54 | 65 | 340 | 160 | 17 | 16,8 | 173 | 175 |
| 10 | 7 9 | 120 | 325 | 37 | 15 | 210 | 140 | 15 | 8 | 155 | 101 |
| 11 | 7 5 | 160 | 195 | 33 | tr. | 20 | 110 | 3 | 10 3 | 162 | 140 |
| 12 | 7 5 | 70 | 155 | 22 | tr. | 170 | 40 | 2 | 4,8 | 54 | 51 |
| 13 | 7,6 | 235 | 210 | 45 | tr. | 120 | 50 | 3 | 18,3 | 211 | 47 |
| 15 | 7,8 | 130 | 260 | 31 | 40 | 390 | 190 | 5 | 8,5 | 200 | 99 |
| 16 | 7,7 | 265 | 265 | 49 | tr. | 270 | 90 | 12 | 19,3 | 258 | 162 |
| 17 | 7,3 | 215 | 195 | 74 | tr. | 120 | 510 | 17 | 26,3 | 388 | 207 |
| 18 | 8 | 295 | 340 | 45 | 235 | 330 | 500 | 18 | 13,4 | 186 | 142 |
| 19 | 7,5 | 169 | 190 | 36 | tr. | 80 | 80 | 4 | 9,2 | 146 | 132 |
| 21 | 7,8 | 375 | 185 | 77 | 15 | 80 | 120 | 34 | 31,1 | 417 | 235 |
| | | | | | *Sols légèrement acides* | | | | | | |
| 1 | 6,1 | 110 | 100 | 28 | 0 | 140 | 30 | 2 | 6 | 80 | 71 |
| 14 | 6,2 | 130 | 135 | 21 | 0 | 130 | 0 | 0-2 | 4,8 | 95 | 51 |
| 20 | 6,5 | 137 | 185 | 33 | 0 | 90 | 80 | 0 | 7,6 | 145 | 73 |

TABLEAU 2 : *Caractéristiques physico-chimiques des sols utilisés pour la culture du ray-grass et coefficients de distribution*

| | pH | Résultats en p. 1 000 | | | | Résultats en p.p.m. | | | méq./100 g | Coefficients de distribution $K_d$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Argile | Limon | Matières organiques | Calcaire actif | S total | Sr total | Sr échang. | C.E.C. | sans prétraitement | avec prétraitement |
| 24 | 7,5 | 60 | 25 | 28 | 15 | — | 10 | 3 | 8,2 | 70 | 212 |
| 25 | 7,9 | 90 | 145 | 23 | 50 | 80 | 370 | 10 | 6,7 | 98 | 88 |
| 26 | 8,5 | 70 | 125 | 124 | 85 | 480 | 320 | 29 | 20,3 | 82 | 86 |
| 27 | 7,5 | 210 | 325 | 59 | 365 | 2 610 | 530 | 42 | 10,2 | 42 | 73 |
| 28 | 7 8 | 180 | 250 | 49 | 135 | 660 | 480 | 22 | 12,5 | 117 | 102 |
| 29 | 7,9 | 285 | 230 | 87 | 240 | 800 | 1 070 | 44 | 22,9 | 164 | 127 |
| 30 | 7,9 | 215 | 105 | 59 | 40 | 290 | 240 | 17 | 16,4 | 137 | 183 |
| 31 | 7,7 | 280 | 115 | 93 | 25 | 170 | 60 | 7 | 23,7 | 172 | 157 |
| 34 | 8 | 315 | 185 | 60 | 80 | 1 000 | 300 | 32 | 25 | 170 | 214 |
| 35 | 7,5 | 55 | 85 | 36 | 15 | 200 | 20 | 8 | 8,6 | 86 | 77 |
| 37 | 7,7 | 90 | 175 | 53 | 60 | 110 | 20 | 6 | 12,9 | 152 | 80 |
| 38 | 7,5 | 300 | 150 | 111 | 60 | 3 980 | 2 130 | 550 | 40,5 | 14 | 18 |
| 39 | 7,5 | 295 | 155 | 128 | 75 | 3 200 | 12 800 | 1 375 | 28,3 | 41 | 61 |
| 40 | 7,9 | 290 | 360 | 31 | 125 | 4 570 | 390 | 47 | 7,5 | 3 | 3 |
| 43 | 8,3 | 250 | 415 | 72 | 135 | 760 | 640 | 40 | 13,7 | 192 | 57 |
| 45 | | 0 | 25 | 15 | 10 | 10 | 210 | 18 | 1,2 | 26 | 39 |
| 46 | | 280 | 450 | 70 | 210 | 560 | 610 | 64 | 23 | 221 | 159 |
| 50 | 7,9 | 165 | 325 | 47 | 185 | 570 | 450 | 15 | 11,8 | 105 | 147 |
| | | *Sols acides ou non calcaires* (pH $\leqslant$ 7) | | | | | | | | | |
| 32 | 7,7 | 60 | 40 | 36 | 0 | 140 | 20 | 5 | 8,9 | 80 | 80 |
| 33 | 7,5 | 385 | 95 | 163 | 0 | 560 | 40 | 12 | 42 | 287 | 234 |
| 36 | 6,5 | 130 | 25 | 31 | 0 | — | 40 | 4 | 8,6 | 100 | 56 |
| 41 | 5,2 | 15 | 45 | 10 | 0 | — | 10 | 1 | 0-0,3 | 18 | 24 |
| 42 | 5,5 | 50 | 30 | 20 | 0 | 30 | 3 | 0-0,6 | 1,7 | 72 | 35 |
| 44 | 5,4 | 150 | 150 | 57 | 0 | 340 | 60 | 4 | 6,8 | 171 | 97 |
| 47 | | 185 | 195 | 52 | 0 | 50 | 100 | 8 | 13 | 269 | 178 |
| 48 | 7,0 | 170 | 130 | 53 | 0 | 140 | 40 | 10 | 12,9 | 231 | 141 |
| 49 | 6,9 | 135 | 125 | 62 | 0 | — | 60 | 15 | 13,7 | 300 | 209 |
| 51 | 7,8 | 175 | 200 | 37 | 0 | 280 | 90 | 19 | 15,2 | 149 | 223 |
| 52 | 7,5 | 130 | 165 | 36 | 0 | 250 | 100 | 7 | 12,1 | 152 | 127 |
| 53 | 7,5 | 120 | 150 | 39 | 0 | 430 | 110 | 7 | 15,5 | 149 | 162 |

rapides ne permettent pas d'obtenir une estimation satisfaisante du strontium utilisable par la plante.

De même, les coefficients de distribution sol/solution résultant de contact de courtes durées, ne reflètent pas la disponibilité totale du strontium.

On ne peut donc utiliser ce coefficient que pour classer globalement les sols selon leur pouvoir de décontamination vis-à-vis de solutions polluantes strontiques, comme l'avait proposé Mc HENRY.

### B. — *Caractéristiques des sols et teneurs en Sr total des végétaux*

On a ensuite tenté d'établir une relation entre la teneur du végétal en strontium total et les propriétés des sols étudiés.

Il n'est pas indifférent, en effet, qu'une même activité en $^{90}Sr$ par unité de poids de matière végétale, corresponde à des teneurs variables en strontium total du point de vue de l'hygiène alimentaire.

De plus, pour une activité spécifique donnée de Sr du sol, il devrait être intéressant de savoir comment l'on peut réduire l'absorption de Sr par la plante. C'est généralement par le chaulage qu'un tel résultat a été recherché. On trouvera dans un travail de WELTE, KLOKE et MARCKWORDT (1961), une revue des principaux articles traitant de ce problème dont la conclusion générale tend à reconnaître, moyennant des réserves, une certaine efficacité du chaulage, à cet égard, en sols acides. SCHEFFER et LUDWIEG (1959) estiment, qu'en sols bien pourvus en chaux, l'apport supplémentaire de $Ca^{++}$ augmenterait l'absorption de Sr par la plante.

Selon la plupart des auteurs, il est intéressant de relier le rapport (Sr/Ca) dans la plante, au rapport (Sr/Ca) échangeable ; le quotient $k$ de ces deux rapports est le « facteur de distribution » (MENZEL, 1954). Il se définit comme un indice de similitude de comportement de ces deux éléments vis-à-vis de leur absorption par les plantes (MENZEL, *loc.cit* .). Dans de nombreux cas étudiés, ce facteur est voisin de 1, mais il peut aussi s'en écarter notablement.

Dans notre expérimentation, où nous avons préférentiellement étudié des sols calcaires, la notion de calcium échangeable ne présente pas le même intérêt, compte tenu de la solubilité de $CaCO_3$ (non nulle et variable selon les paramètres température, pression partielle de $CO_2$, présence de divers ions) dans la solution du sol ou dans les réactifs d'extraction. D'ailleurs, la teneur en Ca du ray-grass a peu varié (6 à 13 p. 1 000 pour la première coupe, 5 à 14 p. 1 000 pour la seconde coupe), comparativement aux teneurs en strontium (15 à 722 p.p.m. et 13 à 997 p.p.m. respectivement).

Nous avons donc préféré la recherche d'une relation entre l'absorption du strontium par la plante et la possibilité de fourniture de cet élément par le sol, la détermination de $Sr^{++}$ dans les sols ne posant pas plus de problèmes analytiques que celle de $Ca^{++}$.

On a tout d'abord vérifié qu'aucune relation ayant une probabilité suffisante n'existait entre le strontium total absorbé d'une part, et des variables isolées : Sr total, Sr échangeable, capacité d'échange.

De même, une relation simple entre le strontium absorbé et le rapport $\frac{\text{Sr échangeable}}{\text{Capacité d'échange}}$ n'existe pas.

Par strontium échangeable, nous entendons tout le strontium soluble à l'acétate d'ammonium N par extractions successives, ce qui implique une certaine dissolution du carbonate (ou du sulfate) de strontium pouvant exister dans certains sols.

La teneur en Sr de la plante doit être fonction de l'activité chimique $[Sr^{++}]$, donc de la concentration de cet élément dans la solution du sol.

Selon une relation proposée par BOYD, SCHUBERT et ADAMSON (1947), pour représenter l'adsorption de deux cations bivalents par une zéolite, on peut écrire que la quantité de strontium adsorbée par un poids $m$ d'adsorbant est telle que :

$$\left(\frac{Sr}{m}\right) = \frac{E \cdot b_1 \cdot [Sr^{++}]^2}{b_1 \cdot [Sr]^2 + b_2 \cdot [Ca]^2} \qquad (1)$$

Cette relation explique d'ailleurs, comment à taux constant de Sr dans un tel système, l'augmentation de $[Ca^{++}]$, pourrait, en diminuant la quantité adsorbée, faire croître $[Sr^{++}]$, ce qui est en accord avec certains essais de SCHEFFER et LUDWIEG (1958), dans la mesure où le lessivage ne provoque pas l'entraînement de Sr au fur et à mesure de l'augmentation de sa concentration dans la solution du sol.

En présence d'un excès de $CaCO_3$, l'activité chimique de $[Ca^{++}]$ peut être considérée comme constante, aux variations près, dues à la pression de $CO_2$ et à d'autres facteurs pouvant agir sur la solubilité du carbonate.

Dans la formule (1), E représente la capacité d'échange et $b_1$, $b_2$, sont les énergies d'adsorption des deux cations.

La concentration de Sr dans la solution du sol étant toujours faible, on peut admettre que le strontium adsorbé et disponible pourtant pour la plante, est peu différent du strontium extrait comme échangeable.

On a alors :

$$\frac{\text{Sr éch.}}{E} \simeq \frac{b_1 \cdot c^2}{b_1 c^2 + Q} \qquad (2)$$

où $b_1$ et Q sont des constantes et $c$ la concentration de Sr dans la solution du sol.

Si $\rho$ est le rapport $\frac{\text{Sr éch.,}}{E}$, chaque terme exprimé en meq, on aura :

$$c \simeq k \sqrt{\frac{\rho}{1 - \rho}} \qquad (3)$$

En exprimant le strontium échangeable en p.p.m. et E en meq/100 g, on aura :

$$\rho' = \frac{\text{Sr éch. en p.p.m.}}{E \text{ meq/100 g}} \quad \text{et} \quad c \simeq k \sqrt{\frac{\rho'}{438 - \rho'}} \qquad (3\ bis)$$

L'alimentation de la plante peut donc se faire à partir d'une solution de concentration en $Ca^{++}$ constante et de concentration en strontium déterminée par la formule 3 *bis*.

Un graphe de $Sr_A$ absorbé en fonction de $\sqrt{\frac{\rho'}{438 - \rho'}}$ montre que cette relation ne peut être linéarisée qu'au moyen de la double transformation logarithmique (fig. 1 et 2) :

$$\log \log Sr_A = a \cdot \log \frac{\rho'}{438 - \rho'} + b \qquad (4)$$

Pour calculer ρ′ et établir cette représentation, nous avons tenu compte de la différence existant entre les valeurs analytiques obtenues pour Sr éch., et les valeurs réelles pouvant exister dans les sols utilisés, différence provoquée par l'apport de l'entraîneur de la solution radioactive. Cette quantité apportée est l'équivalent de

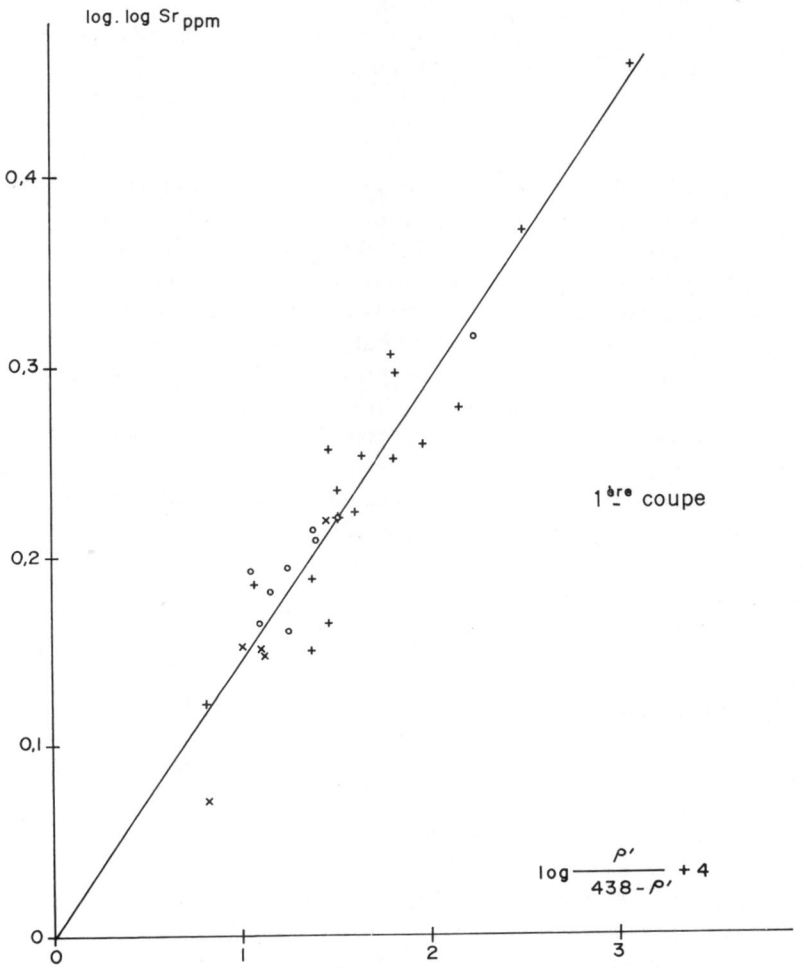



FIG. 1. — *Relation entre le strontium total absorbé par la plante et le rapport strontium échangeable/capacité d'échange*

1re coupe : + : sols calcaires, × : sols neutres, ○ : sols acides

1,25 p.p.m. de Sr échangeable. On a ainsi corrigé les échantillons 24, 36, 37, 41, 42 et 44, dont la teneur en Sr échangeable très faible risquait d'être modifiée par cet apport ; on notera que, par suite de l'apport initial de $Ca(NO_3)_2$, effectué pour réaliser l'alimentation azotée, les sols non calcaires se comportent à peu près comme les sols calcaires.

Ajoutons enfin que l'échantillon 45 n'a pas été retenu, par suite de sa capacité

d'échange extrêmement faible, analytiquement sujette à caution : il s'agit d'un sable presque pur (97,3 p. 100 de sables supérieurs à 50 microns), très pauvre en matières organiques et dont le strontium soluble à $NH_4(Ac)$, provient vraisemblablement de

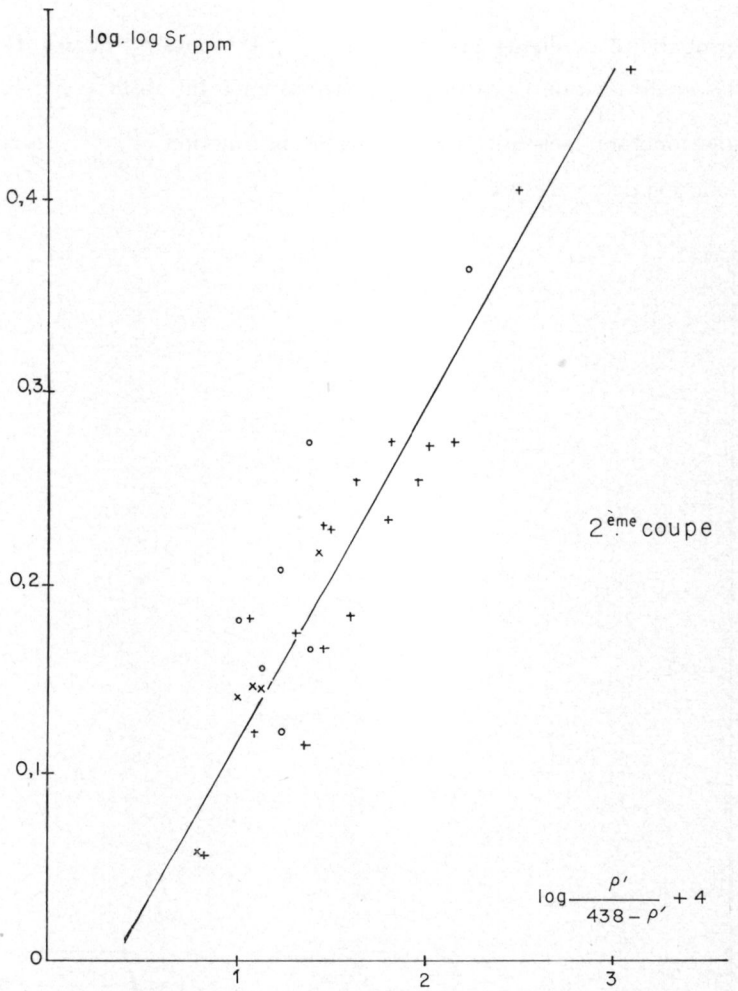



FIG. 2. — *Relation entre le strontium total absorbé par la plante et le rapport strontium échangeable/capacité d'échange*

2e coupe : + sols calcaires, × : sols neutres, o : sols acides

la dissolution de $SrCO_3$ (il contient 12,5 p. 100 de $CaCO_3$ constitué surtout de débris de coquilles).

On obtient donc, pour la première coupe, la relation :

$$Sr_A \text{ (p.p.m.)} = \exp\left\{ 8{,}79 \sqrt{\frac{\rho'}{438 - \rho'}}^{0{,}29} \right\} \qquad (5)$$

avec une probabilité meilleure que 0,001 ($t = 5{,}40^{**}$ pour 27 degrés de liberté), et, pour la seconde coupe :

$$Sr_A \text{ (p.p.m.)} = \exp\left\{ 10 \sqrt{\frac{\rho'}{438 - \rho'}}^{0{,}34} \right\} \qquad (6)$$

avec une probabilité meilleure que 0,001 ($t = 3{,}72^{**}$ pour 27 degrés de liberté).

Dans les conditions de l'expérience, le strontium total absorbé par le végétal, est donc une fonction croissante de $\rho'$, puisque la fonction $\sqrt{\frac{\rho'}{438 - \rho'}}$ croît, elle-même, en fonction de $\rho'$ (fig. 3 et 4).

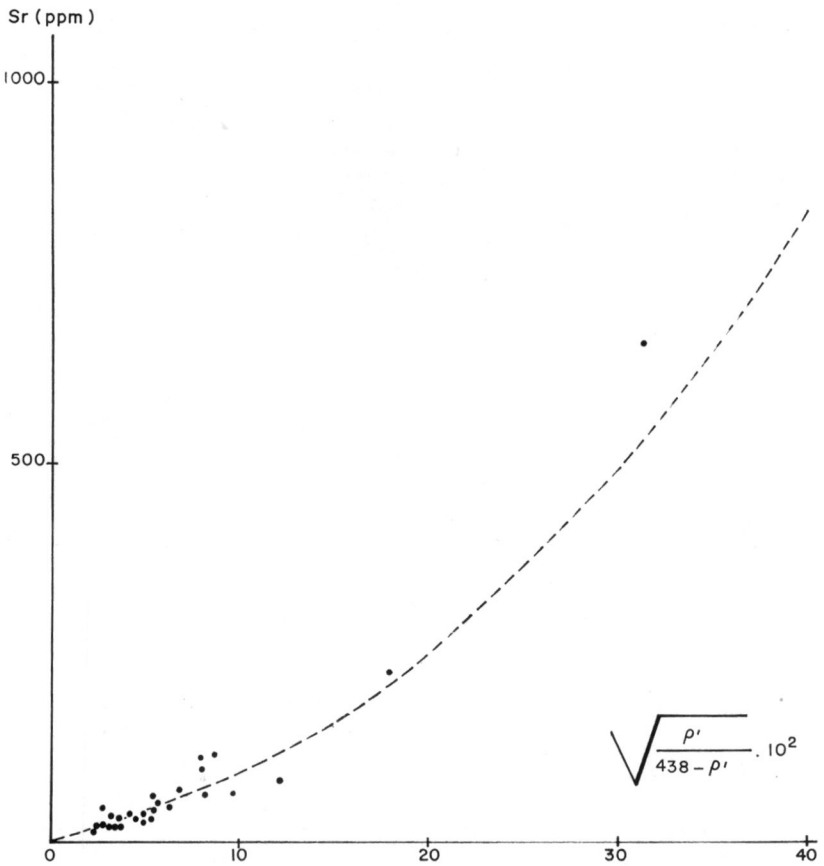



FIG. 3. — *Variation de la fonction* $10^2\sqrt{\frac{\rho'}{438 - \rho'}}$ *et position des données expérimentales*

En étudiant séparément les deux termes du rapport $\rho'$, la plupart des auteurs trouvent une corrélation positive de $Sr_A$ avec Sr éch., (YUDINTSEVA *et al.*, 1969) et une corrélation négative avec la capacité d'échange (GUNTHER et SCHROEDER, 1968).

On notera que la teneur en calcaire fin (calcaire actif) n'intervient pas sur $Sr_A$, les phénomènes d'absorption de Sr par $CaCO_3$ (GUENNELON *et al.*, 1969), s'ils limitent la disponibilité de ce cation, sont sans doute contrebalancés par la solubilité de ce carbonate de calcium qui peut, selon son origine, être plus ou moins chargé en strontianite.

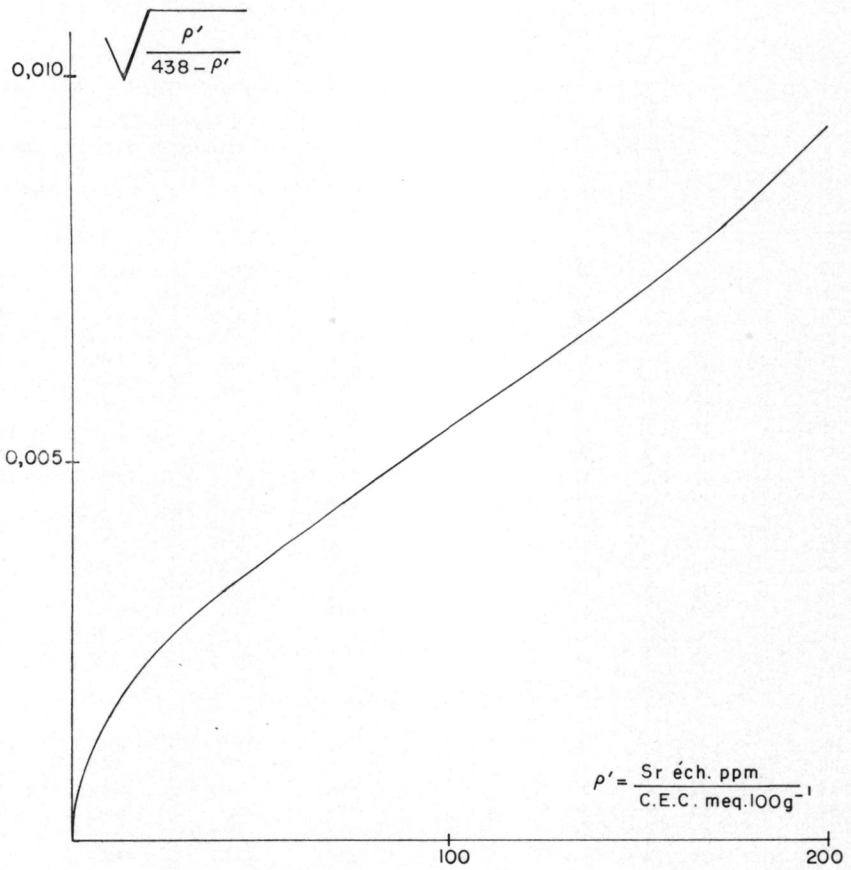



FIG. 4. — *Relation entre ρ′ et le facteur de concentration* $\sqrt{\frac{\rho'}{438-\rho'}}$

C. — *Caractéristiques des sols et absorption du strontium radioactif apporté*

Le but principal de ce travail est évidemment de déterminer les facteurs qui agissent le plus sur l'absorption du strontium, fraîchement incorporé au sol, simulant une pollution récente. Une prolongation de cette étude aura pour but de rechercher à nouveau le taux de contamination du ray-grass deux ans après la première culture.

Sur les 50 000 picocuries de $^{90}Sr$ apportés pour chaque essai, la culture n'en a absorbé qu'une faible fraction, allant de 78 picocuries par gramme (en matière sèche) pour le sol 38 (2e coupe) à 5 371 pour le sol 41 (2e coupe) soit, par récolte, une

exportation de 160 à 6 500 picocuries (3 à 130 p. 1 000 de la quantité apportée). Il est intéressant de savoir dans quelles limites cette radiocativité absorbée dépend des caractéristiques des sols. Le tableau 3 donne la teneur en Sr total, la radioactivité

TABLEAU 3

*Teneurs du ray-grass en strontium total et $^{90}Sr$; activités spécifiques des cultures et des sols*

| | Sr total (p.p.m.) | | Activité totale (pCi/g M S) | | Activité spécifique (pCi/µg de Sr) | | Activité spécifique sols (pCi/ µgSr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | I | II | I | II | |
| 24 | 34 | 33 | 469 | 485 | 13,8 | 14,70 | 19,4 |
| 25 | 61 | 52 | 551 | 424 | 9,05 | 8,15 | 6,2 |
| 26 | 53 | 49 | 176 | 177 | 3,3 | 3,60 | 4,1 |
| 27 | 65 | 62 | 177 | 172 | 2,7 | 2,80 | 2,9 |
| 28 | 47 | 33 | 309 | 233 | 6,6 | 7,05 | 5,4 |
| 29 | 70 | 62 | 171 | 149 | 2,45 | 2,40 | 2,8 |
| 30 | 26 | 20 | 208 | 135 | 8 | 6,75 | 6,8 |
| 31 | 21 | 13 | 174 | 153 | 8,3 | 11,75 | 15,2 |
| 34 | 65 | 50 | 148 | 114 | 2,3 | 2,3 | 3,8 |
| 35 | 35 | 31 | 421 | 380 | 12 | 12,25 | 13,5 |
| 37 | 29 | 21 | 338 | 245 | 11,65 | 11,65 | 17,2 |
| 38 | 223 | 345 | 99 | 78 | 0,45 | 0,25 | 0,20 |
| 39 | 722 | 997 | 109 | 94 | 0,15 | 0,10 | 0,10 |
| 40 | 79 | 76 | 379 | 272 | 4,80 | 3,60 | 2,6 |
| 43 | 96 | 75 | 309 | 223 | 3,20 | 3,00 | 3,0 |
| 45 | 53 | 61 | 1 595 | 1 332 | 30,1 | 20,80 | 6,5 |
| 46 | 106 | 74 | 280 | 164 | 2,65 | 2,20 | 1,9 |
| 50 | 29 | 29 | 292 | 248 | 10,05 | 8,55 | 7,7 |
| | | | *Sols non calcaires* | | | | |
| 32 | 26 | 25 | 492 | 456 | 18,9 | 18,25 | 20,0 |
| 33 | 15 | 13 | 111 | 83 | 7,4 | 6,40 | 9,4 |
| 48 | 37 | 21 | 263 | 192 | 7,10 | 9,15 | 11,1 |
| 49 | 42 | 29 | 287 | 190 | 6,8 | 6,55 | 7,7 |
| 51 | 45 | 44 | 233 | 247 | 5,20 | 5,60 | 6,2 |
| 52 | 26 | 25 | 358 | 280 | 13,75 | 11,20 | 15,2 |
| 53 | 27 | 24 | 365 | 277 | 13,50 | 11,55 | 15,2 |
| | | | *Sols acides* | | | | |
| 36 | 38 | 33 | 744 | 517 | 19,60 | 15,65 | 23,8 |
| 41 | 117 | 202 | 3 120 | 5 371 | 26,65 | 26,60 | 55,6 |
| 42 | 44 | 75 | 2 179 | 2 895 | 49,50 | 38,60 | 67,6 |
| 44 | 28 | 41 | 719 | 685 | 25,70 | 16,70 | 23,8 |
| 47 | 34 | 25 | 374 | 252 | 11,00 | 10,10 | 13,5 |

des plantes, les activités spécifiques des plantes et des sols, pour les essais en sols calcaires, en sols neutres non calcaires et en sols acides.

On note tout d'abord que l'activité absorbée ne présente pas de corrélation avec le strontium total absorbé, ce qui s'explique par le fait que l'activité spécifique par

microgramme de Sr disponible dans le sol n'est pas constante, par suite des variations de Sr échangeable.

Mais on constate aussi que l'activité spécifique $(^{90}Sr/Sr)_{plante}$ n'est pas égale à l'activité spécifique $(^{90}Sr/Sr$ échangeable$)_{sol}$ (que l'on corrige ou non la valeur de Sr échangeable mesurée, pour tenir compte de l'apport d'entraîneur).

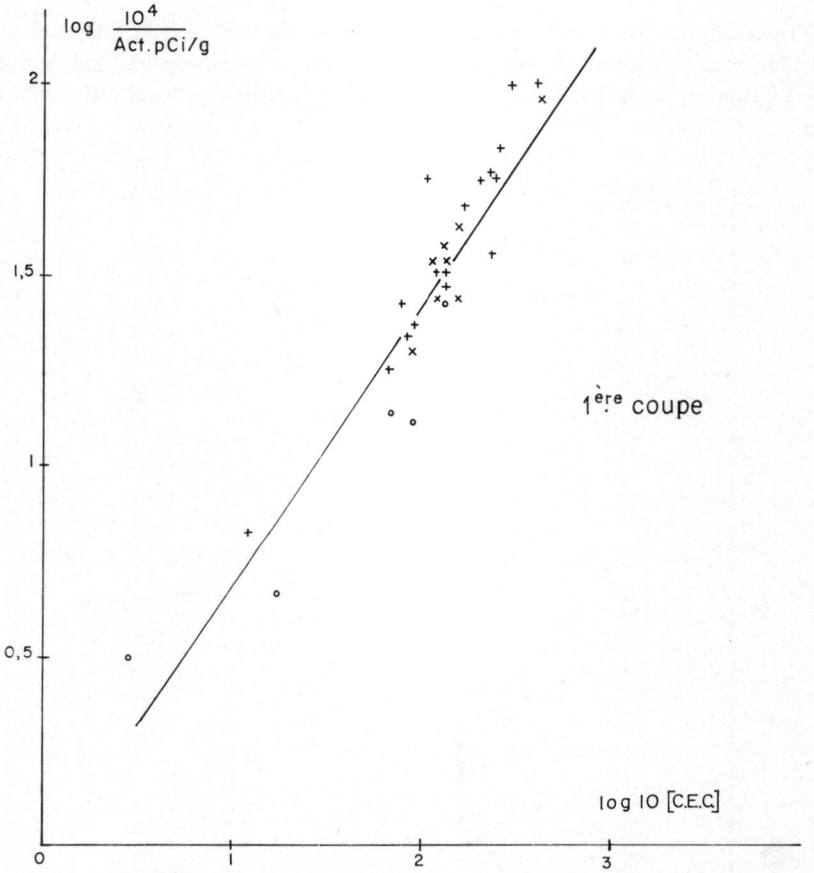



FIG. 5. — *Relation entre l'activité absorbée par la plante et la capacité d'échange du sol* (1re coupe)

Par contre, on a pu mettre en évidence une relation entre l'inverse de la radioactivité absorbée et la capacité d'échange : on a ainsi pour la première et la seconde coupe :

$$\log \frac{100}{A_1} = 0{,}756\,63 \log [10\,E] - 0{,}067\,99 \qquad (7)$$

$$\log \frac{100}{A_2} = 0{,}895\,76 \log [10\,E] - 0{,}275\,31 \qquad (8)$$

avec $t = 5{,}96^*$ et $t = 7{,}47^{**}$ pour 28 degrés de liberté (fig. 5 et 6).

On a, dès lors :

$$A_1 = \frac{2\,049}{E^{0,756}} \qquad (9)$$

et

$$A_2 = \frac{2\,397}{E^{0,896}} \qquad (10)$$

On peut donc dire que, lors d'apports de strontium au sol, la quantité absorbée par la plante et provenant de ces apports, est inversement proportionnelle à la capacité d'échange et ne dépend pas du strontium disponible préexistant ; cela signifie

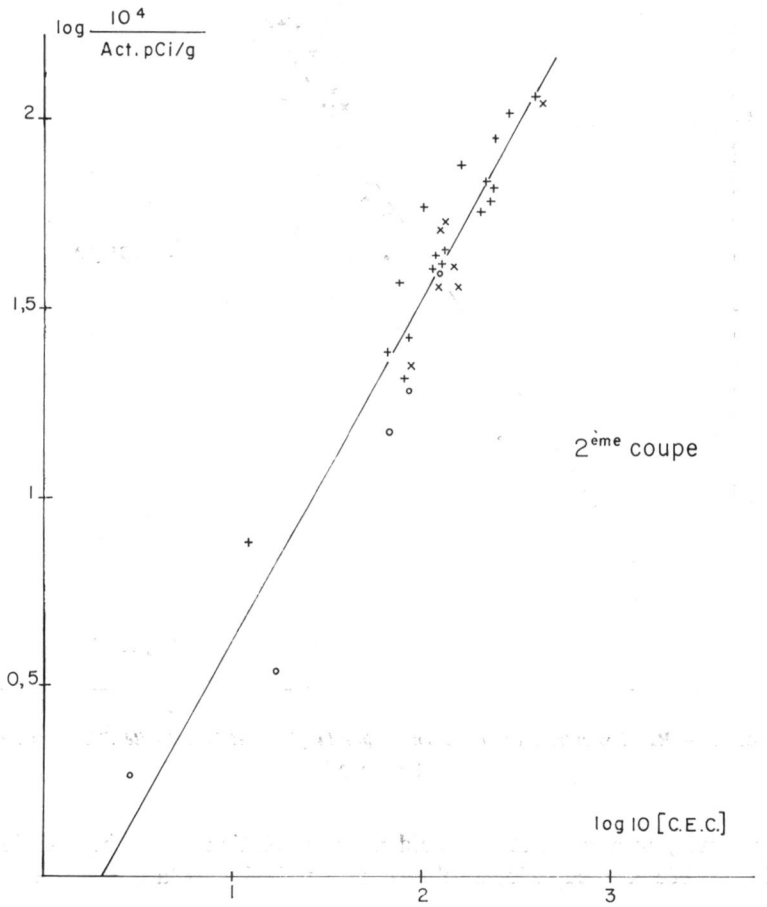



FIG. 6. — *Relation entre l'activité absorbée par la plante et la capacité d'échange du sol* (2e coupe)

que la dilution isotopique dans le sol n'est pas réalisée, et cela est valable, dans les conditions de l'expérience, pendant une durée minimum de cinq semaines (entre le semis et la seconde coupe).

## IV. — PRÉVISION DE LA CONTAMINATION DE LA PLANTE ET CONSÉQUENCES PRATIQUES

Le but final des travaux sur la contamination des végétaux est la prévision de la teneur des plantes en éléments radioactifs et éventuellement la détermination des moyens permettant de réduire ce niveau de contamination.

De l'analyse des résultats faite au paragraphe C, on voit que, pour un apport récent de $^{90}Sr$, l'absorption est inversement proportionnelle à la capacité d'échange du sol. Il n'est donc pas possible d'agir sur la pénétration du strontium, si ce n'est par des apports massifs de matériaux à forte capacité d'échange.

Dans les conditions de contamination utilisées, la variation relative du taux de capacité d'échange nécessaire pour obtenir une diminution de 50 p. 100 de l'activité absorbée est, par dérivation de la formule 9 :

$$\left|\frac{\Delta E}{E}\right| \simeq 0{,}666 \qquad (11)$$

Pour un sol ayant une capacité d'échange de 10 meq/100 g, une réduction de 500 pCi à 250 pCi/g de M.S., nécessite une augmentation relative de la capacité d'échange de 6,6 meq/100 g. Ceci correspond à un apport de l'ordre de 200 tonnes à l'hectare, d'un produit ayant une CEC de 1 meq par g. Ce procédé est donc pratiquement inutilisable.

Par contre, pour un sol sableux, à capacité extrêmement faible, le même calcul peut conduire à des apports plus faibles (de l'ordre de la dizaine de tonnes), tout en étant efficaces. Dans de tels sols, une bonne mesure préventive, qui est aussi une pratique culturale correcte, serait d'effectuer des apports massifs répétés de matières organiques (tourbe, engrais verts, etc.), voire même des marnages avec un matériel peu calcaire relativement à sa capacité d'échange. De toutes façons, la réduction importante d'une contamination des récoltes, par une pollution récente du sol, est une opération techniquement et économiquement peu praticable.

Peut-on par ailleurs, envisager de réduire l'absorption de $^{90}Sr$ en apportant, durant la période de pollution du sol, un élément déterminé comme le strontium non radioactif ? L'expérience réalisée, utilisant une seule dose d'entraîneur, ne peut permettre de répondre directement à cette question. Toutefois, si l'on constate que les teneurs du ray-grass cultivé, dans notre essai, peuvent s'élever jusqu'à 1 000 p.p.m. (en MS), sans toxicité apparente, on peut en déduire que des apports de strontium augmentant le taux de Sr disponible, augmenteront l'absorption de cet élément, ce qui entraînera, il est vrai, une diminution de l'activité spécifique par rapport au strontium absorbé, sans modifier l'absorption de $^{90}Sr$ récemment incorporé au sol.

Enfin, est-il possible de diminuer l'absorption de $^{90}Sr$ récemment apporté en augmentant à l'avance le stock de strontium échangeable ? Comme l'absorption de cet élément fraîchement incorporé dépend surtout de la capacité d'échange (formule 9), il ne faudrait espérer qu'une diminution de l'activité spécifique, ce qui peut être un résultat recherché par les hygiénistes. Pour que le résultat soit appréciable, 1 faudrait augmenter considérablement le niveau du strontium total absorbé.

Or, en différenciant la formule 5 où l'on remplace

$$\varphi' \text{ par } \rho = \frac{\text{Sr échangeable en meq/100 g}}{\text{E meq/100 g}} = \frac{s}{E},$$

soit :

$$Sr_A = \exp\left\{ 8{,}79 \left(\frac{s}{E - s}\right)^{0{,}15} \right\}$$

$$\frac{dSr_A}{Sr_A} = 1\,32 \frac{E}{(E - s)^2} \cdot ds, \qquad (5\ bis)$$

on obtient :

$$\frac{\Delta Sr_A}{Sr_A} \simeq \frac{1\,32}{E} \cdot \Delta s,$$

car $s$ en meq reste petit par rapport à E.

Une augmentation de 13 p. 100 déterminée par cette formule pour un sol ayant une capacité d'échange de 10 meq/100 g serait acquise pour $\Delta s = 1$ meq/100 g, ce qui représente approximativement 1 300 kg à l'hectare. Comme l'augmentation souhaitable devrait permettre d'atteindre des niveaux égaux à 10 voire même 100 fois le stock existant, on doit s'attendre à être obligé de prévoir des apports de près de 2 000 tonnes à l'hectare en Sr, ce qui représente des tonnages d'amendements irréalisables. Encore, serait-il nécessaire que ce strontium reste sous forme échangeable et ne soit pas insolubilisé ou lessivé. Le carbonate de strontium, compte tenu de sa solubilité et de la teneur en eau des sols, ne peut en aucun cas permettre d'effectuer des relèvements rapides aussi considérables du taux de Sr disponible.

TABLEAU 4

*Valeurs moyennes des activités et des caractéristiques pour trois classes de sol*

| | Activité de la plante en pCi/g de MS | | Activité spécifique en pCi/µg de Sr | | C. E. C. en méq. pour 100 g | Sr total en p.p.m. (sols) | Sr échangeable en p.p.m. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1re coupe | 2e coupe | 1re coupe | 2e coupe | | | |
| Sols calcaires ..... | 344 | 282 | 7,3 | 6,7 | 16 | 1 146 | 129 |
| Sols non calcaires non décalcifiés . | 301 | 246 | 10,4 | 9,8 | 17,2 | 65 | 12 |
| Sols décalcifiés ... | 1 427 | 1 944 | 26,5 | 21,5 | 6 | 42 | 3,5 |

Ces résultats sont en accord avec ceux de ROMNEY *et al.* (1959) qui estiment que, dans certains cas, les quantités de strontium à apporter pour obtenir un effet intéressant (diminution de 15 à 30 p. 100), sont de l'ordre de 10 tonnes à l'hectare ; FREDRIKSSON *et al.* (1959) avaient également conclu à l'influence insignifiante du stron-

tium stable apporté, sur l'absorption du strontium radioactif présent dans le sol. Leurs conclusions obtenues par des expériences basées sur la réalisation d'apports croissants de Sr stable, sont donc confirmées par une autre voie et par l'application d'une formule valable pour un grand nombre de types de sols.

La nature du sol n'est cependant pas sans effet notable sur la contamination de la plante. En effet, si l'on considère les groupes de sols définis au tableau 3, on peut noter les résultats assez intéressants exprimés au tableau 4, mais qui s'expliquent en fait par les valeurs moyennes de la capacité d'échange et du strontium total et échangeable.

## V. — CONCLUSIONS

Cette étude montre la difficulté d'intervenir de façon efficace pour diminuer la contamination des plantes poussant sur des sols calcaires pollués par le strontium-90.

La pollution accidentelle (de quelque origine que ce soit) de sols calcaires ne conduit donc pas à première vue à une situation bien meilleure que celle des sols acides quant à la contamination de la plante, en ce qui concerne les méthodes de récupération des sols.

Seuls, les sols calcaires riches en strontium (et présentant donc des teneurs très élevées en cet élément sous forme échangeable ou facilement soluble), peuvent laisser prévoir une contamination du végétal plus faible, pour des apports de $^{90}Sr$ relativement anciens (supérieurs à trois ou quatre mois).

*Reçu pour publication en juin 1972.*

## SUMMARY

INTERRELATED PROPERTIES OF SOILS AND STRONTIUM UPTAKE BY RYE-GRASS GROWN ON CALCAREOUS SOILS

An investigation, involving some fifty different soils, shows how difficult it is to correlate the strontium distribution ratio of a soil and a contact solution with the physico-chemical properties of this soil ; more particularly, exchange capacity is not adequate as a single criterion since the soil content of soluble strontium apparently plays a major role.

The total strontium absorbed is an increasing function of the exchangeable strontium/exchange-capacity ratio, but variational absorption rates are only marked when inputs of readily-soluble strontium are heavy.

A strontium input tagged just before cultivation instances a contamination ratio depending solely on the exchange capacity of the soil and is inversely proportional at least over the 8 weeks cultivation lasted. Here again, a lower rate of contamination can only be secured by a positive alteration of the exchange capacity ; however the amount of material (clay, organic matter) that would be needed is for practical reasons, much too large. Yet, some effect may be expected in sandy soils the cationic exchange-capacity of which is very low.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DER BODENBESCHAFFENHEIT UND DER AUFNAHME VON STRONTIUM DURCH EINEN RAY-GRASS-ANBAU AUF KALKHALTIGEM BODEN

Eine Untersuchung von ungefähr fünfzig Böden zeigt wie schwer es ist, den Verteilingskœffizienten des Strontiums im Böden und in einer Berührungslösung mit den physischen und chemischen Merkmalen dieses Bödens in Bezug zu bringen. Insbesondere kann die Ionen-Austauschkapazität nicht als einziger Gesichtspunkt dienen. Der lösliche Strontiumgehalt des Bödens scheint eine bedeutende Rolle zu spielen.

Das gesamte aufgenommene Strontium ist eine steigende Funktion des Verhältnisses : austauschbares Strontium/Ionen-Austauschkapazität, jedoch verzeichnet man starke Schwankungen der Aufnahmesätze nur für starke Zugaben von leicht löslichem Strontium.

Eine Gabe von markiertem (gezeichnetem) Strontium vor dem anbau spiegelt sich in einem Verseuchungssatz wieder, der lediglich von der Austauschkapazität des Bödens abhängt. Dieser Verseuchungssats steht im umgekehrten Proportionalverhältnis zur Austauschkapazität, zumindest während der achtwöchigen Dauer des Anbaus. Hier konnte lediglich eine Minderung der Verseuchungssätze durch eine positive Veränderung der Austauschkapazität erreicht werden, jedoch ist die Menge der zu zuführenden Stoffe (Ton, organische Stoffe) in der Praxis viel zu gross. Eine gewisse Wirkung kann man jedoch voraussehen bei sandigen Böden mit einer sehr geringen Ionenaustauschkapazität Austauschkapazität (C. E. C.).

## РЕЗЮМЕ

### Отношения между свойствами почв и поглощением стронция райграсом в известковых почвах.

Р. ГЕННЕЛОН, А. КОНЕЗА, А. М. де КОКБОРН.

Исследование около пятидесяти образцов почв показывает, что трудно связать коэффициент распределения стронция между почвой и раствором контакта с физико-химическими особенностями этой почвы; в особенности, ёмкость обмена не может, одна, быть критерием; содержание растворимого стронция в почве играет, кажется, важную роль.

Общее количество поглощенного стронция представляет возрастающую функцию обменный стронций / емкость обмена, но изменения поглощенных количеств — уловимы только в случаях крупных внесений легко растворимого стронция. Внесение меченного стронция перед началом культуры выражается процентом загрязнения зависящим только от емкости обмена почвы : процент этот обратно пропорционален емкости обмена, по крайней мере в течение восьми недель что длится культура. И в этом случае, можно достичь сокращения процента загрязнения только изменением емкости обмена в положительную сторону; но количество материала (глина, органическое вещество), которое для этого необходимо внести, в практике, слишком велико. Некоторый эффект можно однако предвидеть в песчаной почве со слабой емкостью обмена катионами.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BOYD G. E., SCHUBERT J., ADAMSON, 1947. The exchange adsorption of ions aqueous solution by organic zeolites. Ion exchange equilibria. *J. Amer. Chem. Soc.*, **169**, 2818-2829.

COMMONWEALTH BUREAU OF SOILS. *Strontium 90 in soils* (1960-1966). (Bibliography on) nº 1034, Harpenden, England.

DROUINEAU G., 1942. Un dosage rapide de l'activité du calcaire des sols. *Ann. agron.*, 441.

EPSTEIN E., LEGGET J. E., 1954. The absorption of alkaline earth cations by barley roots : Kinetics and mechanism. *Amer. J. Bot.*, **41**, 785-791.

FREDRIKSSON L., ERIKSSON B., RASMUSON B., GAHNE B., EDVARSON K., LOW K., 1958. Studies on soil-plant-animal interrelationships with respect to fission products (A/Conf. 15/P/177). *Atompraxis*, **5**, 369.

GUENNELON R., CONESA A. P., DE COCKBORNE A. M., DRUJON P., 1969. Aspects de la disponibilité et de l'absorption par les plantes du strontium en sols calcaires. C. E. A., *Actes du Symposium inter. de Radio-écologie*, Cadarache, 761-780.

GUNTHER J., SCHROEDER D., 1968. Effect of soil properties on the uptake of radioactive strontium by plants. I. Investigations with white clover and rye-grass on Schleswig-Holstein soils. *Z. Pflanzenernähr*, **119**, 216-226.

MACHARGUE J. S., 1919. Effect of certain compounds of baryum and strontium on the growth of plants. *J. Agric. Res.*, **16**, 183-195.

HASEKHOFF E., 1893. Versuche über die schädliche Wirkung von nickelhaltigem Wasser auf Pflanze. *Landwirtsch. Jb.*, **22**, 862-867.

MCHENRY J. R., 1958. Ion-exchange properties of strontium in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 514-518.

MENZEL R. G., 1954. Competitive uptake by plants of potassium, rubidium, cesium and calcium, strontium, baryum from soils. *Soil Sci.*, **77**, 419-425.

MORTENSEN J. L., MARCUSIU E. C., 1963. Fission products-soil organic matter complexes : I. $^{90}Sr$-$^{90}Y$, in water extracts and HCl hydrolysats of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 653-656.

NISHITA J., TAYLOR P., 1964. Influence of stable Sr and Ca on $^{90}Sr$ and $^{45}Ca$ in soils and clay minerals. *Soil Sci.*, **98**, 181-186.

ROBERTS H., MENZEL R. G., 1961. Availability of exchangeable and non exchangeable Sr-90 to plants. *Agric. Food Chem.*, **9**, 95-98.

ROMNEY E. M., ALEXANDER G. V., RHOADS W. A., LARSON K. H.,1959. Influence of Ca on plant uptake of $^{90}Sr$ and stable strontium. *Soil Sci.*, **87**, 160.

SCHEFFER F., LUDWIEG F., 1959. Gefässversuche über die aufnahme von Radiostrontium aus dem Boden. *Z. Pflanzenernähr.*, **85**, 224-249.

SCHULZ R. K., OVERSTREET R., BABCOCK K. L., 1958. On the soil chemistry of radiostrontium. *Hilgardia*, **27**, 333-342.

SCHULZ R. K., RIEDEL H. M., 1961. Effect of aging on fixation of $^{90}Sr$ by soils. *Soil Sci.*, **91**, 262-264.

TAYLOR P., 1968. Strontium retention in acid soils of the North Carolina coastal plain. *Soil Sci.*, **106**, 440-447.

WALSH T., 1945. The effect on plant growth of substituting strontium for calcium in acid soils. *Proc. Roy. Irish Acad.*, B 50, 287-294.

WELTE E., KLOKE A. P., MARCKWORDT U., 1961. Untersuchungen zur Minderung der Strontiumaufnahme durch die Pflanze aus dem Boden. *Atompraxis*, **7**, 1, 3-7.

YUDINTSEVA E. V., GULYAKIN I. V., PANOV V. Z., 1969. Accumulation of strontium-90 from various soils. *Agrokhimiya*, **1**, 75-84.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 517-531.

# ASSOLEMENTS ET SUCCESSIONS DE CULTURES EN AUNIS

B. COCHARD [1] et H. MANICHON

*Laboratoire de Recherches de la Chaire d'Agriculture,*
*Institut national agronomique, I.N.R.A.,*
*16, rue Claude Bernard,*
*75231 Paris Cedex 05*

## RÉSUMÉ

Une étude des assolements et successions de cultures en Aunis a permis de préciser la nature des facteurs de leurs variations. Le milieu naturel, les caractéristiques des cultures, les objectifs de production des agriculteurs influencent à la fois les assolements et les successions de cultures pratiquées dans cette région de l'ouest de la France.

Cependant, les problèmes de gestion du travail permettent facilement d'expliquer les assolements, alors que ceux d'entretien de la fertilité des sols sont liés aux successions de cultures.

En conséquence, on peut admettre que les assolements et les successions de cultures sont deux aspects d'une même réalité : les systèmes de cultures. Leur étude doit se poursuivre, à la fois, par la méthode expérimentale appropriée à la connaissance de l'influence des successions de cultures sur la fertilité des sols, les techniques de modélisation aptes à la construction des assolements, et les méthodes statistiques qui seules permettent de vérifier à la fois les deux aspects du problème.

## INTRODUCTION

Les études d'assolements, de successions, et de systèmes de cultures dont se soucièrent nombre d'agronomes du siècle dernier comme De Gasparin (1850), Heuzé (1862), Risler (1898) préoccupent à nouveau nos contemporains : Hénin *et al.* (1960), Hénin et Sébillotte (1962), Marty et Courau (1969), Jacquard *et al.* (1969). Ces problèmes sont souvent abordés par voie expérimentale, au niveau de la parcelle culturale, sous l'angle des conséquences sur la fertilité des sols de certaines rotations ou successions de cultures. L'aspect assolement est en outre examiné par certains économistes (Chombart de Lauwe *et al.*, 1969), au niveau de l'exploitation

[1] Adresse actuelle : Station d'Agronomie, Centre de Recherches de Toulouse, I. N. R. A., B. P. 12, 31-Castanet-Tolosan.

agricole, sous l'angle des résultats financiers et des contraintes de gestion des divers facteurs de la production, notamment du travail et de l'équipement.

La synthèse de ces deux aspects que veut recouvrir la notion de système de culture amène certains à dire qu'une bonne classification des systèmes de cultures doit se faire à partir de deux grandes séries de critères agronomiques et économiques en considérant l'exploitation agricole comme une structure essentielle de leur étude (SÉBILLOTTE, 1968).

Afin de vérifier ces hypothèses, dans le cadre d'une étude de potentialités agricoles entreprise avec d'autres chercheurs (I. N. R. A.-I. N. A.-A. D. A. C., 1969), nous avons étudié à la fois les assolements d'un certain nombre d'exploitations, et les successions de cultures de parcelles labourées, dans une région de Charente-Maritime, l'Aunis. Avant d'examiner les résultats, nous présenterons comme cadre d'étude : cette région, puis la méthode et les techniques utilisées, et nous discuterons enfin les résultats obtenus.

## I. — CADRE D'ÉTUDE

### A. — *La région*

La région se trouve à l'ouest de la France, à proximité de La Rochelle et couvre les trois cantons de Surgères, La Jarrie, Aigrefeuille-d'Aunis. L'Aunis proprement dit est constitué d'un plateau calcaire bordé à l'ouest par l'Océan, au nord et au sud par le marais charentais, à l'est par la Saintonge. En dehors des terres de marais, essentiellement formées de dépôts marins argileux, pris sur la mer à différentes périodes de l'histoire, et actuellement utilisés en pâturages extensifs, on trouve sur le plateau deux types de terres calcaires qui constituent les terres hautes et sont dénommées groies lourdes et groies légères. Nous les avons caractérisées par ailleurs (COCHARD et DEFFONTAINES, 1970).

Le climat océanique présente fréquemment une sécheresse estivale, des pluies d'automne et d'hiver, avec une absence de grands froids. Les activités économiques sont essentiellement tournées vers l'agriculture avec, comme principales spéculations, les céréales, quelques plantes sarclées telles le tournesol, les cultures fourragères (luzerne), l'élevage laitier. Les structures agricoles et la technicité générale des exploitants correspondent à celles d'une région française moyenne, c'est-à-dire ni particulièrement à la pointe, ni en marge du progrès.

### B. — *Méthode d'étude*

La méthode d'étude est essentiellement statistique. A partir de données d'enquêtes, on obtient une image des variations des caractères étudiés, comme les assolements et les successions de cultures. Un rapprochement entre les variations de ces divers caractères permet de connaître leurs relations réciproques.

### C. — *Techniques*

La base des informations étant des interviews d'agriculteurs, les échantillons retenus ont été choisis essentiellement en fonction des possibilités d'introduction auprès des exploitants, en éliminant tous ceux pour lesquels l'agriculture n'était pas l'activité principale, et en essayant de recou-

vrir l'ensemble de la région. Les assolements de 1967-1968 de 22 exploitations ont été décrits, et les successions de cultures de 112 parcelles cultivées en blé, orge ou tournesol, dont les rendements de 1967 ou 1968 étaient connus.

TABLEAU I

*Terminologie et abréviation employées*

S.A.U. : Surface agricole utile
S.F.T. : Surface fourragère totale
M. : Marais
S.L. : Surface labourée
C.F. : Culture fourragère
S.F.C. : Surfaces fourragères cultivées = Surface des cultures fourragères
Pailles : blé tendre
orge
avoine
blé dur

Cultures fourragères : betterave fourragère
choux
fourrages cultivés : luzerne
trèfle
ray-grass
maïs fourrage (distribué en vert)

Têtes de rotation non fourragères : tournesol
maïs (grain ou ensilé)
colza

L'hétérogénéité relative des informations n'a permis que des dépouillements à l'aide de méthodes statistiques sommaires : corrélations simples, différences de moyennes, tables de présence-absence, etc.

Les mêmes cultures ayant parfois des noms divers selon les agriculteurs, par convention nous avons adopté la terminologie et les abréviations indiquées dans le tableau 1.

## II. — RÉSULTATS

### A. — *Assolements*

Le tableau 2 résume la description des assolements des 22 exploitations soumises à enquête. La part du marais, des fourrages cultivés et des céréales (pailles) varie d'une exploitation à l'autre. Certaines cultures comme le tournesol, les betteraves fourragères, les choux sont parfois absentes. Bien que présentant des points communs, tous les assolements des diverses exploitations diffèrent entre eux.

Le milieu naturel, principalement le terrain, influence ces assolements. Ainsi, on ne trouve de tournesol que dans les exploitations possédant des groies légères. Tous les marais sont toujours couverts en herbe. La proportion des surfaces en marais dans la SAU (M) est en relation avec celle des cultures fourragères dans les surfaces labourées (CF) comme l'indique l'existence d'une corrélation significative ($r = 0{,}55$) entre les rapports SAU et CF. On peut donc penser que les marais conditionnent les

TABLEAU 2

*Assolements en 1968*

| Agriculteurs | SAU (ha) | $\frac{M}{SAU} \times 100$ | $\frac{SFC}{SFT} \times 100$ | Pailles | | Fourrages cultivés | | Betteraves fourragères | | Tête de rotations non fourragères (% SL) | | Choux fourragers | | Sols (1) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | surf. | % SL | surf. | % SL | surf. | % SL | total | tournesol | surf. | % SL | |
| 1 | 45 | 0 | — | 34 | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 14 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 35 | 0 | 100 | 23 | 66 | 9 | 24 | 1,5 | 3 | 6 | 6 | 0,5 | 1 | 1 |
| 3 | 35 | 0 | 100 | 20 | 57 | 10 | 28 | 1,3 | 4 | 11 | 11 | 0,2 | 1 | 1 |
| 4 | 89 | 9 | 72 | 52 | 64 | 17 | 22 | 2 | 2 | 11 | 11 | 1,3 | 1 | 1 |
| 5 | 60 | 10 | 78 | 35 | 63 | 20 | 34 | 1,5 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 6 | 30 | 10 | 74 | 16 | 58 | 8 | 30 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0,7 | 3 | 1 |
| 7 | 51 | 10 | 78 | 25 | 55 | 15 | 32 | 2 | 4 | 9 | 9 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 73 | 10 | 77 | 35 | 56 | 37 | 30 | 4 | 6 | 8 | 8 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 49 | 12 | 74 | 22 | 51 | 14 | 33 | 1,3 | 3 | 12 | 12 | 0,3 | 1 | 1 |
| 10 | 94 | 12 | 75 | 45 | 53 | 28 | 33 | 1 | 1 | 11 | 10 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 77 | 13 | 68 | 40 | 60 | 18 | 27 | 1 | 1 | 8 | 0 | 2 | 3 | n |
| 12 | 55 | 13 | 71 | 31 | 65 | 15 | 31 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | n |
| 13 | 22 | 14 | 62 | 12 | 64 | 4 | 23 | 0,6 | 3 | 11 | 11 | 0 | 0 | 1 |
| 14 | 25 | 16 | 75 | 9 | 33 | 10 | 48 | 1 | 5 | 0 | 0 | 1 | 5 | n |
| 15 | 48 | 17 | 65 | 26 | 64 | 13 | 34 | 1,5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | n |
| 16 | 54 | 17 | 72 | 20 | 44 | 20 | 44 | 2 | 4 | 7 | 7 | 1 | 2 | 1 |
| 17 | 90 | 19 | 63 | 40 | 54 | 23 | 31 | 3 | 4 | 9 | 5 | 0,5 | 1 | 1 |
| 18 | 42 | 20 | 63 | 20 | 59 | 12 | 36 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0,5 | 1 | n |
| 19 | 63 | 20 | 60 | 36 | 52 | 17 | 34 | 2 | 4 | 8 | 8 | 0 | 0 | 1 |
| 20 | 133 | 25 | 60 | 47 | 47 | 41 | 41 | 7 | 7 | 5 | 0 | 1 | 1 | n |
| 21 | 47 | 29 | 56 | 20 | 52 | 14 | 37 | 2,3 | 6 | 0 | 0 | 1,4 | 4 | n |
| 22 | 73 | 30 | 48 | 29 | 57 | 19 | 36 | 2 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 1 |

(1) **1** : présence de groies légères sur l'exploitation.
n : absence de groies légères.

assolements des terres hautes, vérifiant statistiquement des résultats obtenus par les économistes à l'aide des techniques de modélisation (ATTONATY *et al.*, 1969).

L'importance des surfaces fourragères dans l'assolement est naturellement en relation étroite avec celle du bétail, comme le montre le tableau de corrélations assolement et cheptel (tabl. 3). Elle est aussi fonction de la dimension des exploitations. Ainsi, les exploitations de 40 à 70 ha de SAU ont un assolement plus fourrager que celles de 70 à 100 ha (40,3 p. 100 de fourrages dans la SL pour les premières, contre 33,8 p. 100 pour les secondes). La différence est significative.

TABLEAU 3

*Corrélation assolements et cheptel*

| Caractéristiques exprimées en tête et en ha | Nombre de couples | *r* | Signification |
|---|---|---|---|
| Total bovins × SFT | 19 | 0,922 | HS |
| Bovins-vaches laitières × marais | 19 | 0,679 | HS |
| Vaches laitières × SFC | 20 | 0,688 | HS |
| Vaches laitières × SFT | 20 | 0,874 | HS |
| Vaches laitières × surface en betteraves | 20 | 0,93 | HS |

Il n'existe pas de relation nette entre la main-d'œuvre, le matériel, l'équipement des exploitations et l'assolement. Cela provient de l'importance des phénomènes d'entraide très nombreux dans la région et non pris en compte au cours de l'enquête.

TABLEAU 4

*Calendrier des principaux travaux d'une exploitation*

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Blé | | A | | Dh | | | R | D | | | LS | |
| Orge | | F | F | S Dh | | | R | D | | | L | L |
| Tournesol | | F | F | S | B | BB | | | R | | L | L |
| Betteraves | | F | F | S | B | BB | | | | | RL | L |
| Luzerne 1 an | | | | | $C_1$ | | $C_2$ | | P | P | | |

*N. B.* : Il s'agit de groupes de travaux relatifs aux cultures.

*Légende* : A épandage d'Azote
Dh désherbage
R récolte
D déchaumage
F façons superficielles
S semis
B binages
L labour et engrais de fond
$C_1$ 1re coupe
$C_2$ 2e coupe
P pâture

La diversité des spéculations au sein des assolements peut s'expliquer à l'aide de celle des objectifs recherchés par l'agriculteur : production de lait, de viande, de grains pour satisfaire divers impératifs d'autoconsommation et de vente. L'examen des calendriers de travaux (tabl. 4) met en évidence l'importance d'un autre facteur : l'étalement du travail au cours de l'année. Ainsi, la culture d'orge de printemps, à la place de celle du blé d'automne, présente l'avantage de différer les labours en novembre, décembre et les semis en mars, avril.

En conclusion, les principaux caractères de différenciation des assolements d'Aunis sont le terrain, la nature des productions recherchées, la dimension des exploitations, et la réalisation du plein emploi de la main-d'œuvre au long de l'année.

## B. — *Successions de cultures*

### 1. *Description.*

A l'aide des observations de successions de cultures de parcelles portant en 1967 ou 1968 du blé, de l'orge, du tournesol, nous avons pu établir le tableau 5. Les successions présentent des points communs, mais divergent notamment par le nombre de pailles successives ou la présence de cultures autres que les fourrages ou les pailles. Toutes comprennent des fourrages et peuvent schématiquement se ramener à l'un des 3 cas suivants :

A : fourrage ; $m$ pailles.

B : fourrage ; $n$ pailles ; autres cultures ; $p$ pailles.

C : fourrage ; $q$ pailles ; autres cultures ; $r$ pailles ; autres cultures ; $s$ pailles.

($m$, $n$, $p$, $q$, $r$, $s$, étant des nombres entiers, positifs, se déduisant en parties des valeurs $x_1$, $x_2$, $z$ du tableau).

TABLEAU 5

*Successions de cultures*

| Parcelles | Nombre | Successions | Observations |
|---|---|---|---|
| Blés après tournesol ou betteraves | 31 | Tête — $x_1$ pailles, tournesol, blé ou betteraves | $1 \leqslant x_1 \leqslant 3$ |
| Blés après luzerne | 35 | Orge — $y$ années de luzerne, blé | $y = 3$ dans 70 % des cas |
| Orges après blé | 36 | Tête — $z$ pailles, blé, orge | $0 \leqslant z \leqslant 3$<br>$z = 0$ dans 68 % des cas lorsque $z > 0$ la tête est un fourrage |
| Tournesol | 10 | Tête — $x_2$ pailles, tournesol | $1 \leqslant x_2 \leqslant 3$ |

On peut ainsi schématiser deux grands types de rotations D et E :

D : fourrage ; $x$ pailles ; fourrage.

E : fourrage ; $a$ ($x$ pailles — autres cultures).

2. *Facteurs explicatifs.*

La localisation des parcelles influence la nature des successions pratiquées. Ainsi, à proximité des bâtiments d'élevage, on trouve des successions plus fourragères qu'au loin. Cela est à rapprocher d'une observation, à propos des luzernes : DEFFONTAINES (1969) a montré que toutes les parcelles distantes de plus de 1 km des bâtiments d'exploitation étaient davantage soumises à la fauche que les autres. Ce phénomène se comprend très bien quand on sait que le déplacement du bétail laitier est un gros handicap dans le cadre d'un habitat groupé comme en Aunis.

Les relations entre successions de cultures et nature des terrains font ressortir l'influence du milieu naturel. Ainsi, comme précédemment dans l'étude des assolements, on constate que les successions avec tournesol ne se rencontrent que sur les groies légères. Les luzernes sont plus fréquentes dans ces terres que dans les groies lourdes. L'été sec de 1964 a en outre nui à leur implantation.

La présence depuis seulement 2-3 ans du tournesol dans les successions ne s'explique que par l'évolution technico-économique de la région : implantation d'un organisme stockeur spécialisé, et introduction de la variété *Pérédovik*.

L'alternance entre les divers types de cultures comme fourrages et pailles trouve son explication la plus valable au niveau de la recherche par l'agriculteur de divers types de productions qui ne présentent pas les mêmes exigences d'entretien de la fertilité des sols. Nous avons pu vérifier partiellement cette affirmation en examinant la flore adventice des céréales et les fumures pratiquées sur certaines cultures.

3. *Flore adventice et fumure.*

L'abondance de la flore adventice peut être très néfaste aux rendements des cultures si l'on en juge par les résultats observés à propos du blé (tabl. 6). Sa maîtrise

TABLEAU 6

*Corrélations rendements et abondance des adventices*

| Céréales | Année 1967 | | Année 1968 | |
|---|---|---|---|---|
| | Effectif | Corrélation | Effectif | Corrélation |
| Blé après luzerne ..... | 15 | — 0,65** | 20 | — 0,48* |
| Blé après tournesol ..... | 7 | — 0,03 | 10 | — 0,60** |
| Blé après betteraves ..... | — | — | 13 | — 0,77** |
| Ensemble blé ..... | 22 | — 0,49* | 43 | — 0,46** |
| Orge ..... | 15 | — 0,41 | 21 | + 0,09 |

** Hautement significatif seuil P = 0,01.
* Significatif seuil P = 0,05.

constitue donc un aspect important du maintien en bon état de fertilité des sols. Elle dépend effectivement des techniques de désherbage utilisées. Ainsi, on constate qu'en Aunis elles ne sont pas toujours très bien adaptées. On emploie du MCPA, du 2,4-D (tabl. 7) inefficaces sur les graminées. Mais la nature des cultures et des

TABLEAU 7

*Emploi de produits désherbants*
(campagne 1967-1968)

| Culture et précédents | Produits (matières actives) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | MCPA | 2,4-D | MCPA + 2,4-D | MCPA + autres | Parcelles non traitées | Total |
| Blé après luzerne..... | 5 | 8 | 1 | 2 | 4 | 20 |
| Blé après tournesol ..... | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 10 |
| Blé après betteraves ..... | 1 | 4 | 3 | 1 | 5 | 14 |
| Orge après blé ..... | 8 | 8 | 2 | 0 | 4 | 22 |
| Total | 16 | 23 | 7 | 4 | 16 | 66 |

TABLEAU 8

*Fréquence de certaines adventices à la récolte 1968*
(p. 100 de stations où l'adventice est présente)

| Espèces | Blé de luzerne | Blé de betteraves | Blé de tournesol | Orge |
|---|---|---|---|---|
| Vulpins ..... | 60 | 71 | 80 | 73 |
| Folles avoines ..... | 10 | 43 | 10 | 41 |
| Ray-grass ..... | 90 | 36 | 20 | 27 |
| Dactyles ..... | 30 | 0 | 0 | 0 |
| Chiendent ..... | 30 | 21 | 0 | 23 |
| Luzernes diverses ..... | 65 | 14 | 0 | 23 |
| Renouée des oiseaux .. | 30 | 56 | 80 | 95 |
| Nombres de stations | 20 | 14 | 10 | 22 |

TABLEAU 9

*Apports de fumier*
(au cours de la succession de cultures)

| Parcelles | Fumier | | Nombre total d'observations |
|---|---|---|---|
| | nombre de cas | % | |
| Blés de betteraves ..... 68 | 8 | 62 | 13 |
| Blés de tournesol ..... 68 | 4 | 44 | 9 |
| Blés de tournesol ..... 67 | 1 | 11 | 9 |
| Tournesol ..... 67 | 2 | 20 | 10 |
| Ensemble ..... | 15 | 37 | 41 |

TABLEAU 10

*Fumures minérales, répartition par classes*

| Culture | | Année | Classes de doses d'éléments | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | TF | F | M | *f* |
| Blé de luzerne | N | 1967 | 0 | 6 | 6 | 8 |
| | | 1968 | 0 | 9 | 8 | 3 |
| | P | 1967 | 4 | 6 | 2 | 8 |
| | | 1968 | 2 | 10 | 8 | 0 |
| | K | 1967 | 2 | 3 | 1 | 14 |
| | | 1968 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| Blé de tournesol | N | 1967 | 0 | 2 | 5 | 2 |
| | | 1968 | 2 | 7 | 0 | 0 |
| | P | 1967 | 0 | 1 | 4 | 3 |
| | | 1968 | 0 | 7 | 2 | 0 |
| | K | 1967 | 0 | 1 | 3 | 4 |
| | | 1968 | 0 | 4 | 1 | 4 |
| Blé de betteraves | N | 1968 | 1 | 9 | 2 | 0 |
| | P | 1968 | 1 | 8 | 3 | 0 |
| | K | 1968 | 1 | 2 | 4 | 5 |
| Orges | N | 1967 | 0 | 5 | 8 | 1 |
| | | 1968 | 0 | 12 | 6 | 3 |
| | P | 1967 | 2 | 4 | 8 | 0 |
| | | 1968 | 7 | 7 | 7 | 0 |
| | K | 1967 | 1 | 2 | 3 | 8 |
| | | 1968 | 2 | 1 | 6 | 12 |
| Tournesol | N | 1967 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| | P | 1967 | 0 | 6 | 1 | 3 |
| | K | 1967 | 6 | 0 | 0 | 4 |

Pour le blé et le tournesol.

| | |
|---|---|
| TF | > 150 |
| F | 100-150 |
| M | 80-100 |
| *f* | < 80 |

Pour l'orge.

| | |
|---|---|
| TF | > 90 |
| F | 70-90 |
| M | 50-70 |
| *f* | < 50 |

précédents favorise la présence de certaines espèces (tabl. 8). Cela tend à prouver que les problèmes de maîtrise des adventices varient selon la nature des successions de cultures, rejoignant par là des faits bien connus des agronomes expérimentateurs (SÉBILLOTTE, 1967).

Sur le plan des fumures, on note des apports de fumier (tabl. 9), des enfouissements, mais aussi des brûlages de pailles au cours des successions de cultures. On ne dispose cependant pas d'informations suffisamment précises pour établir des bilans tant organiques que minéraux. Simplement (tabl. 10) les doses d'engrais minéraux varient selon la nature des cultures, des précédents, du blé et selon les années. Ainsi, pour établir le tableau 10, il a fallu adopter des normes de classement différentes entre blé et orge. Entre précédents à blé, en 1968, les doses de N appliquées après tournesol et betteraves sont supérieures à celles appliquées après luzerne ($\chi^2 = 13{,}49^*$) ; celles de $K_2O$ sont supérieures derrière tournesol à celles derrière les deux autres précédents ($\chi^2 = 17{,}37^*$). Les fumures en 1967 sont inférieures à celles de 1968, pour $P_2O_5$, dans le cas des blés de luzerne et de tournesol ($\chi^2 = 13{,}26^{**}$), et pour N, dans le cas des blés de tournesol ($\chi^2 = 11{,}88^{**}$). Tous ces faits s'expliquent lorsque l'on admet que pour garder son sol en bon état de fertilité, une fumure doit être calculée en fonction de la nature de la culture pratiquée mais aussi de la culture précédente.

4. *Conclusion.*

Les successions de cultures des surfaces labourables varient donc en fonction des objectifs de production, de la localisation des parcelles par rapport aux bâtiments, de la nature des terrains, du climat des diverses années, de l'évolution technico-économique de la région et des conditions d'entretien de la fertilité des sols.

### C. — *Relations assolements et successions de cultures*

Le rapprochement des résultats d'assolement et de successions de cultures fait apparaître l'existence de caractères communs entre ces deux notions :

— présence évidente dans les deux cas des mêmes cultures,
— influence du milieu naturel dans la répartition de celles-ci,
— influence des objectifs de production de l'agriculteur.

Cependant, les rapports de surface entre les diverses cultures au sein des assolements, s'ils restent dans les limites voisines de ceux que l'on trouve entre la présence de ces cultures au sein de longues successions, ne sont pas aussi simples que le laissent supposer les expressions traditionnelles d'assolement biennal, triennal. Il n'existe donc pas de correspondance simple, totale, entre assolements et successions de culture.

Cela provient très certainement du fait que le premier aspect indique bien des difficultés de combinaison des cultures liées aux problèmes de gestion dans l'espace à l'aide de moyens limités comme le montre l'étude des calendriers de travaux, ou comme le laissent supposer les relations entre assolements et dimensions d'exploitations. Le deuxième aspect, lui, essaie de respecter les contraintes d'entretien de fertilité, mais traduit aussi l'évolution technico-économique de l'exploitation au cours des années, non intégrable dans un assolement annuel. En conséquence, l'étude des rela-

tions entre assolements et successions de cultures met en évidence l'existence d'une même réalité que l'on peut appeler le système de cultures à deux aspects : l'un spatial, l'autre temporel.

## III. — DISCUSSION

Ce travail qui montre que les assolements sont fortement dépendants des problèmes de gestion, et les successions de cultures liées à ceux d'entretien de la fertilité, tout en étant deux aspects des systèmes de cultures, vérifie bien les hypothèses de départ.

Ainsi, l'étude des assolements ressort davantage de certains aspects actuels de la compétence des économistes. Celle des successions de cultures ressort pleinement de celle des agronomes. En conséquence, il est logique d'admettre comme SÉBILLOTTE (*op. cit.*) qu'une classification des systèmes de cultures doit se faire à partir de deux grandes séries de critères agronomiques et économiques.

On renoue ainsi avec la vision des agronomes du siècle dernier (HEUZÉ, *op. cit.*, de GASPARIN, *op. cit.*) qui, à la différence de certains contemporains, distinguaient pleinement les trois notions d'assolements, successions et systèmes de cultures.

Cependant, ne trouvant pas de pleine correspondance entre assolements et successions de cultures, nous sommes amenés à rejeter leur notion de rotation. En effet, ce dernier concept n'a tout son sens que si les diverses cultures d'une succession reviennent sur la même parcelle toujours dans le même ordre, d'une manière cyclique. Cela est vrai à la condition que les diverses parcelles de l'exploitation puissent être regroupées en soles de même surface, et que, sur ces soles, on pratique la même succession de cultures ; on aurait alors une pleine correspondance entre assolements et successions de cultures. Il faudrait que toutes les variables qui conditionnent les assolements et les successions de cultures restent immuables dans le temps, contrairement à ce que nous avons montré à propos de l'influence de l'évolution technico-économique de l'Aunis.

En conséquence, il nous semble préférable de substituer à la notion de rotation celle de successions probables de cultures comme le propose SÉBILLOTTE (1968). Cela est beaucoup plus compatible avec les idées de variabilité du climat entre les années et donc de possibilités d'exécution des travaux, d'évolution technico-économique et de croissance des entreprises au cours du temps, familières aux agronomes ou aux économistes. On peut alors plus facilement discuter les avantages et les inconvénients des trois méthodes d'études des systèmes de cultures : la méthode expérimentale, la modélisation, et l'interprétation statistique d'enquêtes sur les assolements et les successions de cultures.

La méthode expérimentale est très familière aux agronomes. Elle consiste à tester en parcelles les effets de successions de cultures sur les rendements et l'entretien de la fertilité des sols. Elle permet de bien mettre en évidence l'action de certains facteurs sur les mécanismes d'élaboration des rendements des diverses cultures et l'entretien de la fertilité des sols. Par exemple, c'est à partir des expérimentations de monoculture pendant de très longues périodes entreprises à Rotham-

sted en Grande-Bretagne, ou à Grignon en France, que l'on a pu démontrer l'existence d'effets néfastes liés à cette pratique. C'est aussi par ce moyen que sont abordés les effets cumulatifs de certaines techniques culturales liés à certains types de successions de cultures. Ainsi, à Versailles, sont comparés les effets sur le sol de divers types d'engrais, à Lusignan sont testés les arrière-effets des cultures fourragères introduites dans les surfaces labourées, à Montluel, est examinée l'influence de diverses successions de cultures sur la battance des sols, à Toulouse, sont comparées diverses successions de cultures soumises ou non à l'irrigation. Les possibilités d'analyse liées à ces importants dispositifs permettent de bien connaître les mécanismes de certains aspects de l'influence des successions de cultures, et des techniques qui y sont attachées sur leurs rendements et l'entretien de la fertilité. Cependant, exigeants en moyens d'investigation, ils sont nécessairement en nombre limité dans l'espace et d'autre part, par nature intègrent très mal les facteurs économiques d'évolution des systèmes de cultures.

Ceux-ci sont, par contre, très présents dans les techniques de modélisation utilisées par les économistes (Attonaty *et al.*, 1970) qui cherchent à définir les assolements permettant la meilleure valorisation des divers moyens de production dont dispose l'agriculteur. Cela suppose d'ailleurs de bien connaître *a priori* l'ensemble des facteurs qui déterminent ces assolements et leurs lois de variation, si l'on ne veut pas courir le risque de projeter dans l'avenir des éléments n'appartenant qu'au passé. Raisonnant en outre exploitation par exploitation, le seul moyen de limiter les erreurs est de fournir à chaque agriculteur les propres moyens de contrôle de gestion de leur entreprise. Cette démarche conduit à vulgariser, en matière de prévision des assolements, les techniques de simulation de budgets calculés de façon automatique plutôt que celles de programmation linéaire (Attonaty *et al.*, 1970).

La méthode que nous avons utilisée ici permet de discuter à la fois les 2 aspects du système de cultures que sont les assolements et les successions de cultures. Ce faisant, elle ne constitue pas en elle-même un outil de prévision à plus ou moins long terme de leur évolution. Par contre, elle est un moyen de contrôle statistique à la disposition des responsables de l'action qui intègre à la fois les implications agronomiques et économiques de l'évolution des systèmes de cultures leur permettant de mieux situer la nature des risques de certaines de leurs décisions. Ainsi on voit très bien que l'agriculteur d'Aunis qui supprime son bétail, par souci de saine gestion de son travail et de ses investissements, ne pratiquera plus à terme les mêmes successions de cultures. Il modifie donc les données d'entretien de fertilité de ses sols, données qu'il peut contrôler en observant sur ses parcelles ce qui se passe au cours des années. La véracité des faits ne peut alors être testée que par répétabilité dans l'espace ou dans le temps impliquant une vérification statistique. C'est ce que nous avons recherché ici, profitant de la multiplicité des données de l'enquête sur les exploitations et les parcelles, pour interpréter statistiquement certains phénomènes. On renoue en quelque sorte avec la tradition de l'agriculture comparée de Risler (*op. cit.*) et Dumont (1951) qui étudiaient les assolements et les systèmes de cultures des pays agricoles, à partir, à la fois, des statistiques agricoles officielles et d'enquêtes personnelles auprès d'exploitants. Par rapport à ces auteurs, notre particularité consiste à davantage considérer l'entreprise agricole et la parcelle culturale comme de véritables unités de base de l'étude des systèmes de cultures et à profiter des connaissances acquises en matière de calcul statistique pour ne pas fondre ces unités dans des sommes

ou des moyennes, mais chaque fois que possible les considérer comme des éléments d'une population. Il est probable qu'en affinant l'outil statistique, on pourrait progresser dans cette voie.

## CONCLUSIONS

L'étude des assolements des exploitations agricoles d'Aunis et des successions de cultures de parcelles labourées de cette région, entreprise par dépouillement statistique d'enquête à ces deux niveaux de territoire, montre qu'il s'agit de deux aspects d'une même réalité habituellement désignée par système de cultures.

Les assolements représentent la dimension spatiale. Ils varient plus particulièrement en fonction de critères facilement mis en évidence dans les études économiques comme la gestion du travail.

Les successions de cultures représentent la dimension temporelle. C'est au travers d'elles que l'ont peut discuter certains aspects agronomiques classiques comme l'entretien de la fertilité.

L'absence de liaison totale entre assolement et successions de cultures imputable à l'évolution des phénomènes au cours du temps montre la nécessité de poursuivre l'étude des systèmes de cultures par les trois voies classiques : la méthode expérimentale, les techniques de modélisation, la méthode statistique. Cette dernière que nous avons utilisée devra se perfectionner en faisant plus largement appel aux techniques modernes de calcul et d'interprétation.

*Reçu pour publication en mai 1972.*

## REMERCIEMENTS

Ce travail d'enquête n'aurait pas pu voir le jour sans la collaboration de différentes personnes que nous tenons à remercier. Nous citerons tout d'abord les demandeurs de l'étude, MM. Rebischung et Deffontaines du S. E. I., ainsi que tous les chercheurs, qui, chacun dans leurs spécialités, travaillèrent avec nous sur le même terrain. Une mention toute particulière doit être faite à M. Attonaty et à son équipe du laboratoire d'Économie rurale I. N. R. A. de Grignon qui, par sa compétence sur les études de systèmes de production nous apporta beaucoup. Nous n'oublierons pas les agriculteurs d'Aunis et leurs conseillers qui nous ont toujours bien accueillis et enfin le personnel du laboratoire et les étudiants de 3e année qui participèrent activement à ce travail : tout particulièrement Mmes et MM. Brygoo, David, Dumas, Fillonneau, Lesire (C. et M.-J.), de Nechaud de Ferral, Pons, Roguê, et Verdure.

## SUMMARY

### CROP ROTATION AND CULTIVATION IN BREAKS IN AUNIS (FRANCE)

Investigating crop rotation and cultivation in breaks in Aunis has ascertained the nature of their variational factors. The environment, the kind of crops, the production goals of farmers affect both crop rotation and cultivation in breaks as is the custom in this part of Western France.

However, the problems of farming methods readily account for crop rotations, whereas those pertaining to upkeeping the fertility of soils are associated with cultivations in breaks.

Hence, it may be considered that crop rotations and cultivation in breaks are two facets of the same actuality, *i.e.*, cultivation methods. Carrying their investigation further requires concurrently the experimental method suitable for ascertaining the influence of cultivation in breaks on the fertility of soils, the proper modelling techniques for crop rotations and statistical methods, the only way whereby both aspects of the problem may be determined concomitantly.

## ZUSAMMENFASSUNG


### FRUCHTWECHSEL UND FRUCHTOLFGE IM BEBIET « AUNIS »

Eine Untersuchung des Fruchtwechsels und der Fruchtfolge in Aunis hat es ermöglicht, die Art der Einflüsse und Ihre Schwankungen zu bestimmen. Die Naturbedingungen, sowie die Merkmale der angebauten Erzeugnisse und die Zielsetzungen der Bauern beeinflussen sowohl den Fruchtwechsel als auch die Fruchtfolge in diesem Gebiete im Westen Frankreichs.

Jedoch die Probleme des Arbeitsaufwandes erklären leicht den Fruchtwechsel, während jedoch die Erhaltung der Fuchtbarkeit der Böden direkt mit der Fruchtfolge im Zusammenhang steht.

Folglich kann man darauss schliessen, dass der Fruchtwechsel und die Fruchtfolge zwei Aspekte einer Wirklichkeit sind : Die Anbausysteme. Die Untersuchung muss weitergeführt werden, sowohl durch bekannte Versuchsmethoden, die geeingnet sind, die Auswirkungen der Fruchtfolge auf die Fruchtbarkeit der Böden zu zeigen und durch Modelbaumethoden und statistiche Methoden, die es ermöglichen, beide Seiten des Problems zu überprüfen.


## РЕЗЮМЕ


Севообороты и чередование культур в районе Онис.

Б. КОШАР, Г. МАНИШОН.

Изучение севооборотов и чередования культур в районе Онис позволило уточнить природу факторов их вариаций. Природная среда, характерности культур и цели продукции влияют одновременно на севообороты и на чередование культур практикующихя в этом районе Западной Франции.

Но, если тип применяющихся севооборотов легко об'яснить проблемами управления работой, чередование культур связано с проблемой поддержания плодородия почв.

Можно, значит, допустить что севообороты и чередование культур являются двумя аспектами одной и той-же реальности : система культур. И их изучение должно продолжаться, как на базе экспериментального метода, соответствующего изучению влияния чередования культур на плодородие почвы, технических приемов моделирования структуры севооборотов, так и статистических методов позволяющих одновременную проверку обоих аспектов проблемы.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ATTONATY J.-M. *et al.*, 1969. *Les systèmes de production d'Aunis.* Document ronéoté, Laboratoire d'Économie rurale I. N. R. A., Grignon.

ATTONATY J.-M., HAUTCOLAS J.-C., 1970. Du programme linéaire au calcul automatisé du budget d'exploitation agricole. *Bull. tech. Inform.*, **255**, 711-740.

CHOMBART DE LAUWE J., POITEVIN J., TIREL J.-C., 1969. *Nouvelle gestion des exploitations agricoles.* Dunod, 507 p.

COCHARD B., DEFFONTAINES J.-P., 1970. Essai de classement des terrains en Aunis pour leur utilisation agricole. *Ann. agron.*, 759-775.

DEFFONTAINES J.-P., 1969. In *Étude technique et économique des systèmes de production en Aunis* I. N. R. A., I. N. A., A. D. A. C.

DUMONT R., 1951. *Voyages en France d'un agronome.* Librairie de Médicis, 470 p.

DE GASPARIN A., 1850. *Cours d'agriculture* (tome V : Les Assolements). Paris.

HENIN S. *et al.*, 1960. *Le profil cultural.* S. E. I. A., Paris.

HÉNIN S., SÉBILLOTTE M., 1962. Si nous parlions assolement. *Bull. C. E. T. A.*, Étude n° 783, Paris.

HEUZÉ G., 1862. *Les assolements et les systèmes de cultures.* Hachette.

I. N. R. A., I. N. A., A. D. A. C., 1969. *Étude technique et économique des systèmes de production en Aunis.* Document ronéoté S. E. I., I. N. R. A., Versailles.

JACQUARD P., CROISIER L., MONNIER G., 1969. Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables I. Effets résiduels de la luzerne sur le blé et le maïs. *Ann. agron.*, 371-433.

MARTY J.-R., COURAU M., 1969. Influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans un sol mal structuré. *Ann. agron.*, 361-369.

RISLER E., 1898. *Géologie agricole.* Paris.

SÉBILLOTTE M., 1967. Compétition entre blé et graminées adventices ; rôle des rotations culturales. *C. R. Acad. Agric.*, 1374-1387.

SÉBILLOTTE M., 1968. Systèmes de cultures. *Encyclopaedia Universalis*, 239-242.

SÉBILLOTTE M., 1968. Les rotations culturales. Approche méthodologique d'une politique dynamique. *Journée F. N. C. E. T. A.*, 1968.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 533-546.

# INFLUENCE DE LA SÉCHERESSE SUR LA CROISSANCE, LE RENDEMENT ET LA COMPOSITION DE LA FÉVEROLE

Suzanne MÉRIAUX
avec la collaboration technique de Josette GONTHIER et C. PERREY

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,*
*BV 1540, 21034 Dijon Cedex*

## RÉSUMÉ

L'étude poursuivie a permis d'établir la courbe de croissance de la plante, montrant une vitesse de croissance très élevée durant la formation des gousses, ainsi que la répercussion de la sécheresse sur la photosynthèse nette et la production de graines. La composition biochimique des différentes parties de la plante n'est pas affectée par la sécheresse, à l'exception de quelques phénomènes d'accumulation transitoires de certains produits de synthèse simples.

La photosynthèse nette et le rendement en graines sont très étroitement liés à la transpiration.

Le rendement en graines dépend de la durée équivalente de sécheresse appliquée à chacune des phases de végétation. La sécheresse permanente agit sur la croissance mais plus encore sur le développement, essentiellement à la nouaison.

## INTRODUCTION

L'intérêt porté à la Féverole (*Vicia faba* L.) comme source de protéines en vue de la production animale intensive justifie la nécessité d'en bien connaître les exigences, plus particulièrement vis-à-vis de l'eau. Dans ce domaine, PICARD, BERTHELEM et FÉLIX (1955), PICARD (1969), BERTHELEM et COMBE (1970) ont, en différentes régions, fait des observations ou établi des relations entre le rendement et la pluviométrie qui permettent de supposer que la phase allant du début de la floraison à la nouaison est critique pour l'alimentation hydrique.

C'est pour préciser les besoins en eau de la Féverole et le comportement de cette plante à des états de sécheresse appliqués à différentes périodes de végétation que nous avons entrepris cette étude. Nous pensons qu'elle apportera des éléments de réponse à des questions pratiques de production et qu'en outre, elle contribuera à la connaissance des mécanismes qui relient la photosynthèse et la transpiration.

## I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

*Matériel végétal :* variété *Strube.*

*Date des principaux stades végétatifs :*

— semis : 19 mars 1971 (graines pré-germées) ;
— levée : 26 mars 1971 ;
— début floraison : 30 avril 1971 ;
— formation des premières gousses : 18 mai 1971 ;
— récolte : 12 juillet 1971.

*Conditions de culture :*

— pots de végétation : type Burgevin (12,550 kg de terre sèche), 5 plantes par pot (réparties sur un cercle) ;
— nature de la terre : argileuse (45 p. 100), neutre (pH : 6,8) ;
capacité de rétention pondérale : 31,4 p. 100 ;
humidité pondérale au point de flétrissement : 15 p. 100 ;
— fertilisation : non limitante (sans apport d'azote) ;
— mesures hydriques : — l'évaporation est supprimée par l'emploi d'un revêtement de plastique noir sur la surface de la terre ;
— l'apport d'eau est réalisé à 50 p. 100 par le fond du pot, à 50 p. 100 à 10 cm de la surface à l'aide d'un tube de plastique perforé (des profils hydriques bimensuels permettent de contrôler l'homogénéité de l'humectation) ;
— la mesure de la transpiration est effectuée quotidiennement (six jours par semaine) par pesée du pot ;
— l'apport d'eau pour chaque traitement hydrique est réalisé quotidiennement à partir du déficit en eau défini par pesée (durant les fortes sécheresses, un apport complémentaire a lieu au cours de la journée). Il est tenu compte du poids de matière verte pour l'ajustement du traitement hydrique.

TABLEAU I

*Données climatologiques sous abri*
(Moyennes journalières)

| | Température maximale (°C) | Température minimale (°C) | Nombre d'heures d'insolation | E.T.P. (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 26-03 au 1-04..... | 12,24 | 1,51 | 8,72 | 2,69 |
| 2-04 au 8-04..... | 17,31 | 5,84 | 7,47 | 2,93 |
| 9-04 au 15-04..... | 20,18 | 8,36 | 10,41 | 4,29 |
| 16-04 au 22-04..... | 20,00 | 7,46 | 8,75 | 3,44 |
| 23-04 au 29-04..... | 13,53 | 6,03 | 3,93 | 2,54 |
| 30-04 au 6-05..... | 15,98 | 5,71 | 2,18 | 2,08 |
| 7-05 au 15-05..... | 23,64 | 11,28 | 7,74 | 4,67 |
| 14-05 au 20-05..... | 23,95 | 13,14 | 8,34 | 5,37 |
| 21-05 au 27-05..... | 17,17 | 8,88 | 5,04 | 1,98 |
| 28-05 au 3-06..... | 20,40 | 9,50 | 3,53 | 4,20 |
| 4-06 au 10-06..... | 19,44 | 12,00 | 4,01 | 2,34 |
| 11-06 au 17-06..... | 16,46 | 8,64 | 4,90 | 2,37 |
| 18-06 au 24-06..... | 20,84 | 11,27 | 7,51 | 3,52 |
| 25-06 au 1-07..... | 20,11 | 12,27 | 7,27 | 3,42 |
| 2-07 au 8-07..... | 26,56 | 16,26 | 12,18 | 7,31 |
| 9-07 au 15-07..... | 30,21 | 19,07 | 9,71 | 9,01 |

*Conditions climatiques.*

Le tableau 1 indique par semaine quelques données moyennes journalières (température maximale, minimale, nombre d'heures d'insolation et E.T.P.).

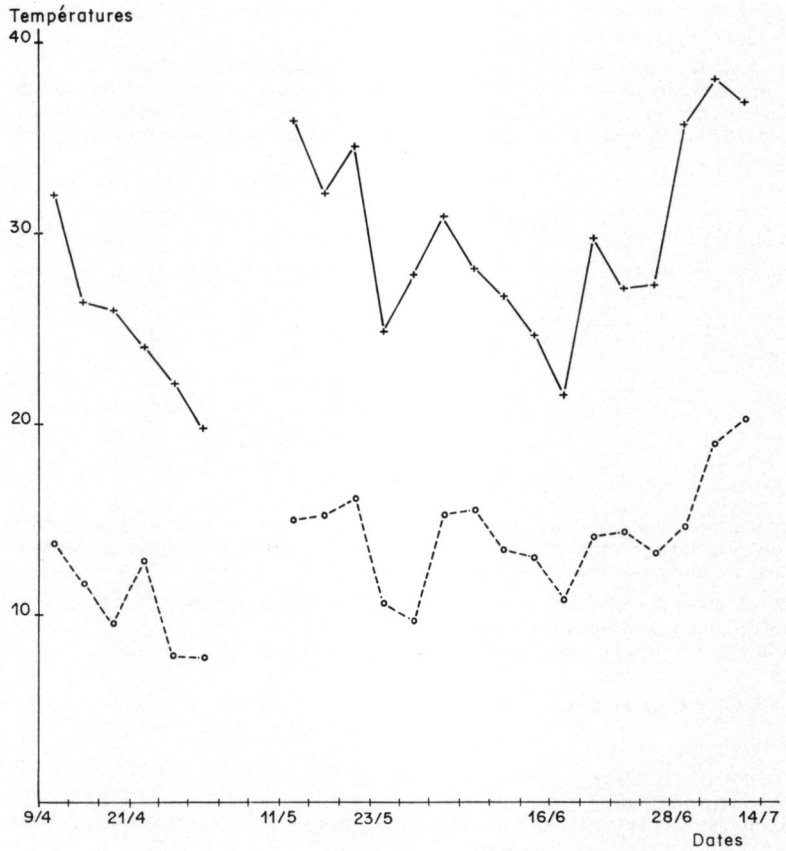



FIG. 1. — *Données météorologiques en terre*

\+ ——— température maximale
o ------ température minimale

La figure 1 indique la moyenne journalière (par période de 4 jours) des températures maximales et minimales brutes, sans abri, relevées sous la serre (serre à toit roulant).

*Protocole expérimental.*

Le but de l'étude consiste à définir les besoins en eau de la Féverole en conditions d'alimentation optimale (traitement A) et à mesurer l'effet de la sécheresse (traitement B) appliquée, soit durant toute la période de végétation, soit durant une ou plusieurs phases du développement de la plante.

Les phases caractéristiques retenues sont :

I : de la levée au début de la floraison (6 à 7 feuilles)
II : du début de la floraison au début de l'apparition des gousses
III : du début de l'apparition des gousses à la maturité de la plante.

Dans les conditions de notre étude en serre, la date des stades et la durée des phases ont été les suivantes :

I : du 26 mars au 29 avril 1971 (35 jours)
II : du 30 avril au 18 mai 1971 (19 jours)
III : du 19 mai au 12 juillet 1971 (55 jours).

Les deux traitements hydriques A et B ont été, pour des raisons pratiques d'exécution, rapportés à une teneur en eau du sol :

traitement A : capacité de rétention (31,4 p. 100 d'humidité pondérale)
traitement B : 65 p. 100 de la capacité de rétention (20,4 p. 100 d'humidité pondérale).
Il convient de souligner qu'il s'agit de l'humidité maximale établie au moment des arrosages.
La répartition des traitements A et B au cours des phases a donné les combinaisons suivantes (4 répartitions) :

| | Phase : | | |
|---|---|---|---|
| N° de combinaison | I | II | III |
| 1 | A | A | A |
| 2 | A | A | B |
| 3 | A | B | A |
| 4 | B | A | A |
| 5 | A | B | B |
| 6 | B | A | B |
| 7 | B | B | A |
| 8 | B | B | B |

*Critères de croissance et de développement.*

Avec une périodicité de deux semaines (8 dates), de la levée à la maturité, nous avons sacrifié, à partir de lots supplémentaires, deux pots de chacune des combinaisons 1 (AAA) et 8 (BBB) sur lesquels les mesures suivantes ont été réalisées :

poids de matière sèche des différents organes de chaque plante ;
longueur des tiges, des gousses ;
nombre de feuilles, de bouquets floraux, de gousses.

*Analyses biochimiques.*

Ont été dosés :

N total (méthode Kjeldahl)
N soluble (micro-Kjeldahl)
Glucides solubles totaux (méthode Somogyi après hydrolyse) } après extraction à l'éthanol à 50°GL
Glucides réducteurs (méthode Somogyi)

P — Ca — Mg — K — Na après minéralisation par voie sèche : (P par colorimétrie ; Ca — Mg par complexométrie ; K — Na par photométrie de flamme).

## II. — RÉSULTATS

### 2. 1. — *Croissance de la plante*

#### 2. 11. *Courbes de croissance.*

La variation de matière sèche de la plante entière et de ses différents organes au cours du temps est donnée sur la figure 2 pour le traitement hydrique optimum (AAA) et sur la figure 3 pour le traitement de sécheresse continue (BBB).

Le tableau 2 indique la variation de longueur des tiges et des gousses.

Sur les tableaux 3 et 4 figurent le nombre d'organes et le poids sec moyen d'un organe.

Pour l'ensemble de ces données, compte tenu de l'hétérogénéité génétique du matériel, nous avons retenu pour le calcul des moyennes par plante, les six plantes les plus homogènes parmi les dix plantes examinées.

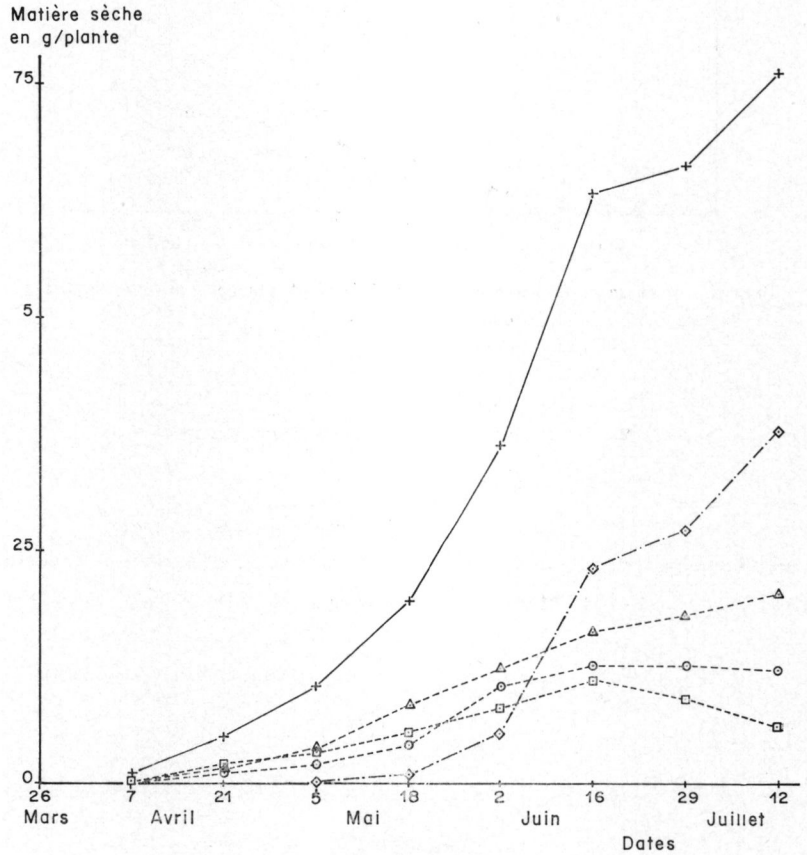



FIG. 2. — *Croissance des différents organes de la plante-témoin* (A)

\+ ——— plante entière
o ------- racines
△ ------- tiges
□ ------- feuilles
◇ —·—·— organes reproducteurs (fleurs, gousses)

Les résultats présentés montrent que la croissance pondérale des organes végétatifs, d'abord très lente, augmente à partir de l'apparition des ébauches florales (20 avril) avec des vitesses maximales situées à des périodes variables selon les organes : deuxième quinzaine de mai pour les racines, début mai à mi-juin pour les tiges, 15 mai à 15 juin pour les feuilles. A partir de cette date, seules les tiges continuent à croître en conditions hydriques optimales.

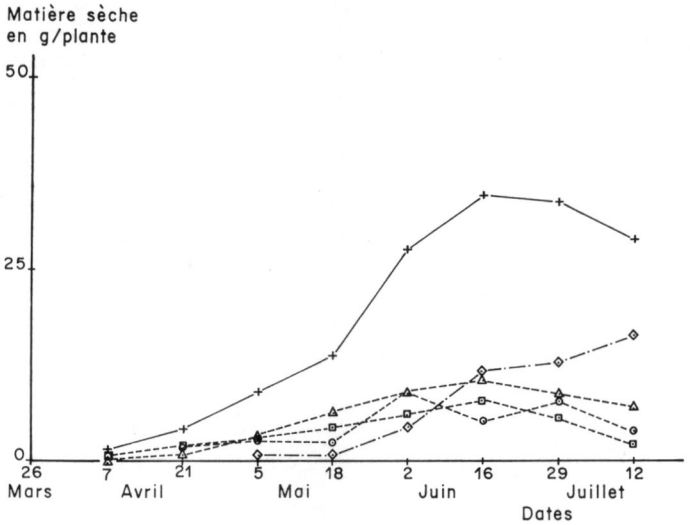



FIG. 3. — *Croissance des différents organes de la plante soumise à la sécheresse* (B)

+ ——— plante entière
o -------- racines
△ -------- tiges
□ -------- feuilles
◇ —·—·— organes reproducteurs (fleurs, gousses

TABLEAU 2

*Variation des tiges et des gousses* (en cm)

| | 7-04-71 | 21-04-71 | 5-05-71 | 18-05-71 | 2-06-71 | 16-06-71 | 29-06-71 | 12-07-71 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tiges A | 16,4 | 36,8 | 76 | 116 | 134,8 | 148,3 | 161,1 | 166,5 |
| Tiges B | 12,5 | 23,7 | 66,1 | 88,4 | 126,2 | 126,8 | 118,8 | 127,4 |
| Long. des gousses A | | | | | | 7 | 6,5 | 5,5 |
| Long. des gousses B | | | | | | 6 | 6 | 5,5 |

TABLEAU 3

*Nombre d'organes* (par plante)

| | 7-04-71 | 21-04-71 | 5-05-71 | 18-05-71 | 2-06-71 | 16-06-71 | 29-06-71 | 12-07-71 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Feuilles A | 5 | 9 | 14 | 23 | 27 | 31 | 30 | 33 |
| Feuilles B | 4 | 9 | 14 | 23 | 28 | 29 | 26 | 27 |
| Bouquets floraux A | 0 | 0 | 4 | 7 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Bouquets floraux B | 0 | 0 | 3 | 6 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| Petites gousses (long. < 1 cm) A | 0 | 0 | 0 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 |
| Petites gousses (long. < 1 cm) B | 0 | 0 | 0 | 7 | 7 | 7 | 0 | 0 |
| Grosses gousses (long. > 1 cm) A | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 14 | 13 | 15 |
| Grosses gousses (long. > 1 cm) B | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 8 | 7 | 8 |

Le développement des organes de reproduction est surtout intense à partir du début de juin. Il conditionne la vitesse de croissance globale maximale de la plante. La sécheresse n'affecte pas le nombre d'organes végétatifs et de bouquets floraux, mais elle a une influence sur la nouaison car elle entraîne une diminution du nombre de gousses.

Le poids d'une feuille donc sa surface est réduit par la sécheresse ainsi que le poids de chaque gousse.

TABLEAU 4

*Poids sec d'un organe* (par plante)
(en grammes)

| | 7-04-71 | 21-04-71 | 5-05-71 | 18-05-71 | 2-06-71 | 16-06-71 | 29-06-71 | 12-07-71 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Feuille A | 0,10 | 0,22 | 0,27 | 0,23 | 0,29 | 0,36 | 0,30 | 0,18 |
| Feuille B | 0,10 | 0,16 | 0,21 | 0,18 | 0,21 | 0,26 | 0,21 | 0,07 |
| Bouquet floral A | | | 0,07 | 0,12 | 0,18 | | | |
| Bouquet floral B | | | 0,07 | 0,10 | 0,07 | | | |
| Petite gousse A | | | | 0,03 | 0,03 | 0,04 | | |
| Petite gousse B | | | | 0,03 | 0,03 | 0,04 | | |
| Grosse gousse A | | | | | 0,56 | 1,64 | 2,06 | 2,50 |
| Grosse gousse B | | | | | 0,93 | 1,36 | 1,80 | 2,02 |

2. 12. *Composition des différents organes.*

La figure 4 reproduit, pour la plante-témoin (A), les teneurs en différents constituants organiques et en potassium des racines, tiges, feuilles, fleurs et gousses. Les taux de calcium, magnésium, sodium et phosphore n'ont pas été portés car ils étaient très faibles.

Nous n'avons pas représenté graphiquement la variation des constituants de la plante soumise à la sécheresse (B) car elle est identique à celle de la plante-témoin, aux exceptions suivantes près qui traduisent l'action de la sécheresse :

— accroissement de la teneur en potassium des racines en fin de végétation, des tiges et des feuilles après la floraison avec diminution corrélative du taux de calcium,
— accroissement passager du taux d'azote soluble des jeunes fleurs,
— accroissement des glucides solubles des fleurs et des jeunes pousses.

Ces dernières accumulations semblent traduire un ralentissement de la synthèse des produits à haut poids moléculaire, phénomène déjà signalé par d'autres auteurs (KYDREV *et al.*, cités par ROBELIN, 1970).

2. 13. *Transpiration au cours du développement et de la croissance de la plante.*

La figure 5 montre la variation de l'E.T.P. mesurée à proximité de la serre et de la transpiration au cours du temps (moyennes journalières pour chacune des 8 périodes).

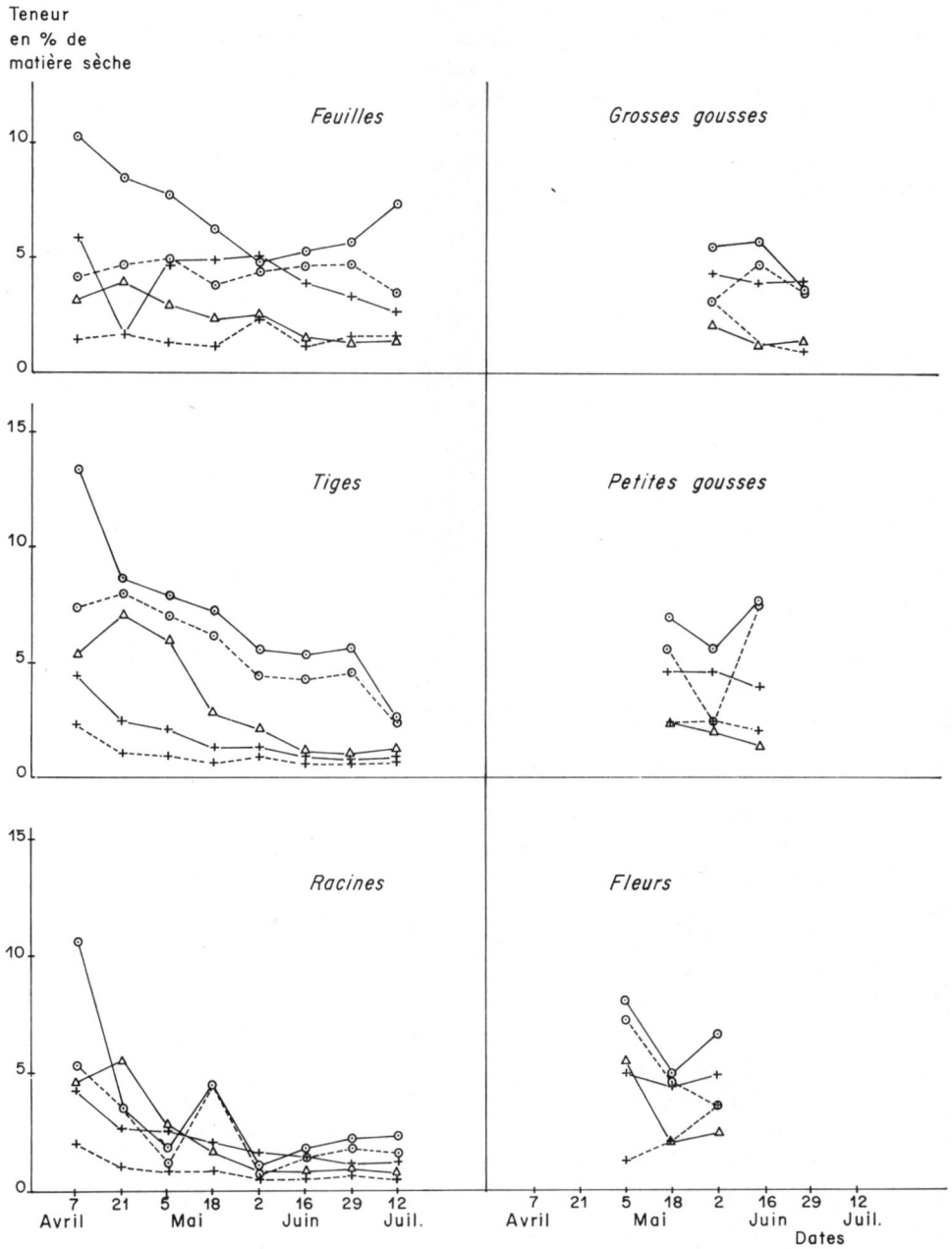



FIG. 4. — *Composition biochimique des différents organes de la plante* (traitement A)

+ ——— N total
+ - - - - - - - N soluble
⊙ ——— Glucides solubles totaux
⊙ - - - - - - - Glucides réducteurs
△ ——— Potassium

A partir du 5 mai jusqu'à la mi-juin, la variation de transpiration suit la variation d'E.T.P. Au-delà de cette date, la transpiration est réduite en raison du flétrissement des feuilles. Cette figure fait aussi apparaître la forte diminution de transpiration des plantes du traitement B (45 p. 100 environ) à partir du début de juin.

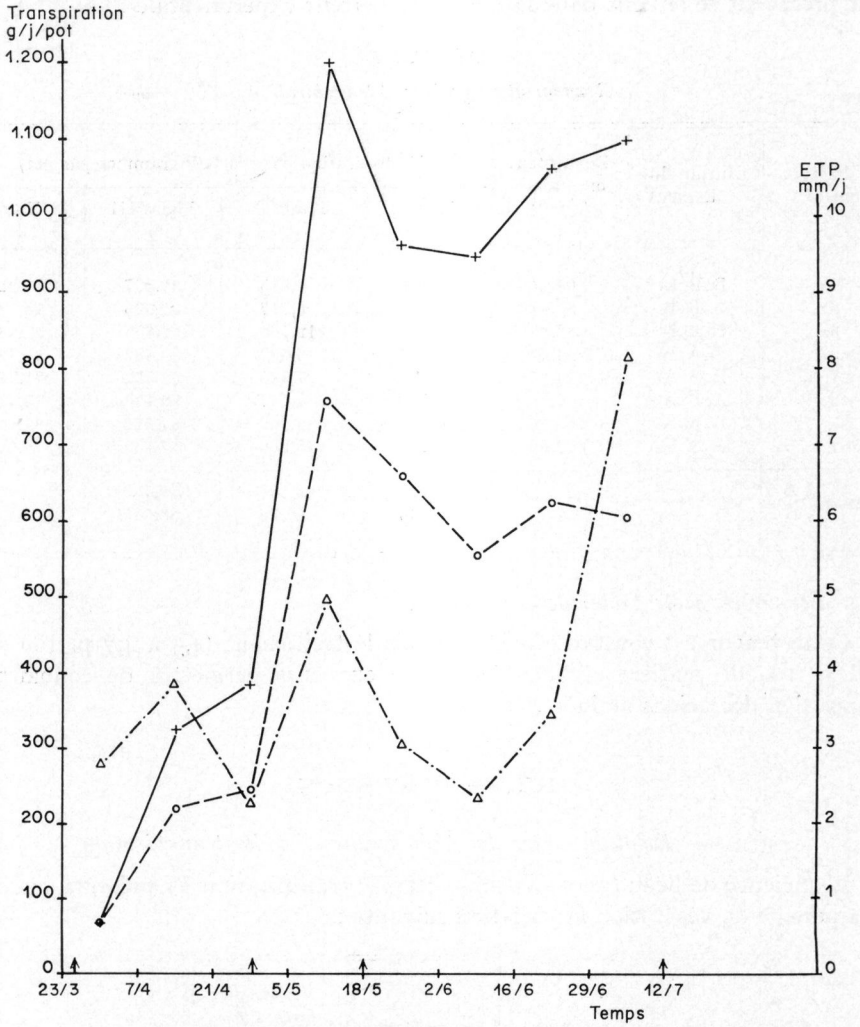



FIG. 5. — *Transpiration et ETP journalières moyennes au cours du temps*

+ ——— transpiration des plantes A
o — — — transpiration des plantes B
△ —·—·— ETP

## 2. 2. — *Effet global des traitements en fin de végétation*

### 2. 21. *Rendement en graines.*

Le tableau 5 fait apparaître l'action des différents traitements hydriques sur le rendement en graines. Il semble à première vue se dégager de ces résultats une influence prépondérante de la sécheresse (B) durant la phase III.

2. 22. *Transpiration pour chaque traitement hydrique.*

La transpiration par phase et pour la durée de la végétation est donnée dans le tableau 5. Dans chacune des phases, les deux traitements sont très différenciés, sans arrière-effet du traitement précédent (les variations observées selon le traitement précédent se situent dans la marge de l'erreur expérimentale).

TABLEAU 5

*Rendement en graines et transpiration*

| N° du traitement | Nature du traitement | Rendement en graines (g/pot) | Transpiration par pot ($10^3$ grammes par pot) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Phase I | Phase II | Phase III | Total |
| 8 | B.B.B | 68,21 | 5,051 | 6,645 | 32,527 | 44,223 |
| 5 | A.B.B | 81,58 | 8,205 | 6,717 | 34,990 | 49,912 |
| 6 | B.A.B | 82,85 | 5,825 | 12,760 | 33,897 | 52,482 |
| 2 | A.A.B | 93,01 | 8,012 | 13,602 | 32,682 | 54,296 |
| 7 | B.B.A | 105,24 | 5,994 | 7,385 | 58,362 | 71,741 |
| 3 | A.B.A | 107,70 | 8,140 | 7,117 | 59,190 | 74,447 |
| 4 | B.A.A | 115,26 | 6,395 | 13,962 | 64,090 | 84,447 |
| 1 | A.A.A | 122,89 | 8,280 | 13,860 | 57,330 | 79,470 |
| Moyenne A | | | 8,159 | 13,546 | 59,743 | |
| Moyenne B | | | 5,806 | 6,966 | 33,524 | |

2. 23. *Teneur en azote protéique des graines.*

Cette teneur est constante quel que soit le traitement (4,5 à 4,7 p. 100 de N total p. 100 de matière sèche). Une étude en cours permettra de connaître la composition des acides aminés.

## III. — DISCUSSION

### 3. 1. — *Relation entre la photosynthèse et la transpiration*

L'efficience de l'eau (photosynthèse nette P/transpiration T) présente au cours de la période de végétation la variation suivante :

| Sous-période | P/T | | Vitesse de croissance d'une plante (g/jour) | | ETP (mm/jour) |
|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | A | B | |
| De la levée à la floraison .... | 4,67 | 5,04 | 0,26 | 0,21 | 3,00 |
| Pleine floraison ..... | 3,49 | 3,62 | 0,68 | 0,35 | 5,02 |
| Période de formation des gousses ..... | 5,28 | 5,47 | 1,52 | 0,83 | 2,72 |
| Après le 16 juin ..... | 0,32 | 0,26 | 0,50 | 0,30 | 5,36 |

L'efficience de l'eau, à chaque période considérée, dépend de la vitesse de croissance de la plante et de l'indice de sécheresse. Elle est d'autant plus grande que la vitesse de croissance est plus grande et le climat moins évaporant (ROBELIN, 1970). Les données précédentes montrent que les conditions optimales ont été réunies durant la période de formation des gousses.

Ces données font apparaître un comportement semblable des plantes des traitements A et B pour chaque période. L'identité de comportement constatée doit se traduire par le fait que, pour chaque période, le déficit de photosynthèse est égal au produit du déficit de transpiration par l'efficience de l'eau du traitement A, ou, de façon plus simple, que la photosynthèse de B est égale au produit de la transpiration de B par l'efficience de l'eau de A (BOUCHET et ROBELIN, 1969 ; ROBELIN, 1967). Nous avons vérifié ces concordances par sous-périodes de 2 semaines jusqu'au 16 juin. L'accord est très bon pour les déficits par sous-période ainsi que pour la somme des déficits des 6 sous-périodes (dans ce dernier cas : 109,29 grammes par pot contre 111,35 grammes par pot pour la différence de photosynthèse des deux traitements au 16 juin, soit un écart de 1,85 p. 100). La concordance est moins bonne mais acceptable (écart de 6,8 p. 100) entre la matière sèche mesurée et la matière sèche calculée pour le traitement B.

Les traitements hydriques appliqués se référant seulement à un état d'humidité du sol, nous avons cherché à caractériser *a posteriori* l'indice de sécheresse réellement appliqué ($\Delta T/T_A$) afin de le relier au déficit de photosynthèse ($\Delta P/P_A$). Nous observons les résultats suivants pour les 4 sous-périodes définies ci-avant :

| Sous-période | $\Delta T/T_A$ | $\Delta P/P_A$ |
|---|---|---|
| De la levée à la floraison ..... | 0,30 | 0,25 |
| Pleine floraison ..... | 0,45 | 0,44 |
| Période de formation des gousses ..... | 0,52 | 0,48 |
| Après le 16 juin ..... | 0,56 | 0,65 |

Ces résultats montrent qu'au cours de la végétation de la Féverole, le déficit de photosynthèse est étroitement lié au déficit de transpiration, à l'exception de la fin de la végétation qui correspond à une modification de morphologie des plantes du traitement B, en particulier à une diminution du nombre de feuilles. Ces données sont conformes à certaines observations de ROBELIN (1967) sur le tournesol.

### 3. 2. — *Relation entre la production de graines et la transpiration*

On observe aussi un parallélisme entre le déficit relatif de transpiration durant toute la période de végétation, en indice moyen de sécheresse ($\Delta T/T_A$), et le déficit relatif de rendement en graines ($\Delta R/R_A$) ainsi que le montrent les résultats suivants :

| N° des combinaisons | Traitement | $\Delta T/T_A$ | $\Delta R/R_A$ |
|---|---|---|---|
| 1 | A A A | 0 | 0 |
| 2 | A A B | 0,32 | 0,24 |
| 3 | A B A | 0,06 | 0,12 |
| 4 | B A A | 0 | 0,06 |

| N° des combinaisons | Traitement | $\Delta T/T_A$ | $\Delta R/R_A$ |
|---|---|---|---|
| 5 | A B B | 0,37 | 0,34 |
| 6 | B A B | 0,34 | 0,33 |
| 7 | B B A | 0,10 | 0,14 |
| 8 | B B B | 0,44 | 0,44 |

La concordance de ces deux séries de données n'étant pas absolue pour toutes les combinaisons de traitement, nous ne pouvons conclure de façon certaine à l'absence de stade critique vis-à-vis de l'eau. Comme l'indice sécheresse a varié selon les phases de végétation, nous avons cherché a en connaître la répercussion sur le rendement en prenant en considération pour chaque phase le produit $it$ ($i = \Delta T/T_A$ ; $t$ = durée de la phase). Ce produit qui représente une durée equivalente de sécheresse est nul pour le traitement A.

Les pesées quotidiennes des pots nous ont permis de calculer $i$ ($= \Delta T/T_A$) du traitement B pour chaque phase :

| | Phase : I | II | III |
|---|---|---|---|
| $i$ ($= \Delta T/T_A$) ..... | 0,29 | 0,45 | 0,43 |
| $t$ (jours)..... | 35 | 19 | 55 |
| $it$ ..... | 10,15 | 8,55 | 23,65 |

En appliquant cette formule à chacune des trois phases, ($i_1t_1$, $i_2t_2$, $i_3t_3$) nous avons calculé les rendements des pots des combinaisons 2 à 7, en référence à la combinaison 8 (BBB) pour laquelle $\Sigma_1^3 it = 42,35$ correspond à $\Delta R = 54,68$ g par pot.

Exemple : combinaison 2

| Phase | I | II | III |
|---|---|---|---|
| Traitement | A | A | B |
| $it$ | 0 | 0 | 23,65 |
| $\Sigma it$ | 23,65 | | |

$$\Delta R = \frac{54,68 \times 23,65}{42,35} = 30,53 \text{ g}$$

$$R = 122,89 - 30,53 = 92,36 \text{ g}$$

| N° des combinaisons | Rendement réel | Rendement calculé | $\Delta R/R$ réel (%) |
|---|---|---|---|
| 2 | 93,01 | 92,36 | — 0,7 |
| 3 | 107,70 | 111,85 | + 3,8 |
| 4 | 115,26 | 109,79 | — 4,7 |
| 5 | 81,58 | 81,32 | — 0,3 |
| 6 | 82,85 | 79,26 | — 4,3 |
| 7 | 105,24 | 98,75 | — 6,2 |

Le rendement calculé de cette façon est en bonne concordance avec le rendement réel. Les résultats sont nettement supérieurs pour certaines combinaisons

à ceux obtenus en utilisant le déficit relatif de transpiration globale. Nous pouvons donc conclure que l'action de la sécheresse sur le rendement en graines de la Féverole ne semble pas dépendante d'un stade végétatif particulier comme nos résultats bruts auraient pu le laisser supposer de prime abord, mais du produit de l'indice de sécheresse par la durée de la sécheresse.

### 3. 3. — *Action de la sécheresse sur le développement de la Féverole*

L'examen du tableau 3 (nombre d'organes) conduit à penser que le seul effet de la sécheresse permanente (BBB) sur le développement se situe à la nouaison (diminution de 46 p. 100 environ du nombre de gousses dès le 16 juin). Il s'y superpose un effet de croissance (poids sec moyen d'une gousse diminué de 19 p. 100). Ce résultat n'est pas en contradiction avec les conclusions précédentes car le rendement final est indépendant de la localisation de la sécheresse dans le temps.

### 3. 4. — *Conséquences pratiques quant à la prévision des effets de la sécheresse*

La notion de durée équivalente de sécheresse devrait permettre la prévision de rendements en graines d'après le déficit d'évapo-transpiration et sa durée. Il conviendrait toutefois que cette hypothèse soit vérifiée dans les conditions du champ.

*Reçu pour publication en mai 1972.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre gratitude à M. ROBELIN pour les suggestions qu'il a bien voulu formuler à l'occasion de ce travail.

## SUMMARY

THE INFLUENCE OF DROUGHT ON THE GROWTH, YIELD AND COMPOSITION OF THE FIELD BEAN

This investigation has enabled to derive the growth curve of the plant, showing a high rate of growth during the formation of the pods, as well as the impact of drought on the net photosynthesis and yield of seeds. Drought does not affect the biochemical composition of all the various parts of the plant, apart from transient accumulative phenomena in a number of simple synthesis compounds.

The yield os seeds and net photosynthesis are closely associated with transpiration.

The yield of seeds depends on the extent of the dry spell each stage of growth underwent. Drought takes effect on growth but even more so on development of the plant, particularly at fruit-setting time.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINFLUSS DER TROCKENHEIT AUD DAS WACHSTUM, DEN ERTRAG UND DIE ZUSAMMENSETZUNG DER KLEINEN SAUBOHNE

Die vorgenommene Untersuchung ermöglichte es, die Wachstumskurve der Pflanze zu erkennen, die ein sehr grosses Wachstum während der Bildung der Schoten aufzeigt, sowie eine Auswirkung der Trockenheit auf die reine Photosynthese und die Erzeugung der Samen. Die biochemische Zusammensetzung der verschiedenen Teile der Pflanze wird von der Trockenheit nicht beeinträchtigt, mit Ausnahme einiger vorübergehender Ansammlungen von einigen einfachen Syntheseerzeugnissen.

Die reine Photosynthese und der Samenertrag stehen in engem Zusammenhang mit der Ausdünstung.

Der Samenertrag hängt von der Trockenheitsmenge jeder zugeordneten Vegetationsphase ab. Eine andauernde Trockenheit wirkt sich auf das Wachstum und mehr noch auf die Entwickling im besonderen bei der Befruchtung aus.



## РЕЗЮМЕ

### Влияние засушливости на рост, урожайность и состав конских бобов.

Сусанна МЭРИО.

Проведенное изучение дало возможность вывести кривую роста растений, указывающую на сильную скорость этого роста во время образования стручков, и на влияние засухи на чистый фотосинтез и продукцию зерна. Биохимический состав различных частей растения не затрагивается засухой, за исключением явлений временного накопления некоторых продуктов простых синтезов.

Чистый фотосинтез и урожай зерен тесно связаны с транспирацией.

Урожай зерен зависит от длительности искуственной засухи, применявшейся в каждой из вегетативных фаз. Постоянная засуха действует на рост, еще больше на развитие, и особенно на узлообразование.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BERTHELEM P., COMBE P., 1970. La féverole. Allons-nous vers un renouveau de sa culture? *Bull. tech. Inform.*, **253**, 613-623.

BOUCHET R.-J., ROBELIN M., 1969. Évapotranspiration potentielle et réelle. Domaine d'utilisation. Portée pratique. *Bull. tech. Inform.*, **238**, 215-223.

PICARD J., 1969. La culture et les variétés de féverole. *Cultivar*, **13**, 13-14.

PICARD J., BERTHELEM P., FÉLIX L., 1955. La culture de la féverole-grain. Quelques données d'expérimentation réalisée en 1952, 1953 et 1954 dans la moitié nord de la France. *Ann. Amélior. Plantes*, **1**, 79-102.

ROBELIN M., 1967. Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. *Ann. agron.*, **18** (6), 579-599.

ROBELIN M., 1970. Bases de raisonnement pour les problèmes concernant l'eau et la production agricole. *Journées Internationales de l'irrigation*, 69-76.

ROBELIN M., 1970. Relations entre l'eau et la plante. Application aux arbres fruitiers. *C^e Congrès de la Société Pomologique de France*, Valence-sur-Rhône, 2 à 4 avril 1970, 101-111.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 547-566.

# LA CINÉTIQUE DE L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS MAJEURS CHEZ LE TOURNESOL

L. GACHON
avec la collaboration technique de G. BAUCHER

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*63100 Clermont Ferrand*

## RÉSUMÉ

L'absorption des éléments nutritifs par le tournesol a été suivie tout au long du cycle végétatif par prélèvements des parties aériennes. Le nouvel hybride *INRA 65-01* a été comparé à *Pérédovik*.

Plante à croissance rapide, le tournesol prélève l'essentiel de ses éléments nutritifs au cours d'une période de 2 mois qui encadre le début de la floraison ; soit environ :

les 9/10 du magnésium,
les 3/4 du potassium,
les 2/3 de l'azote, du phosphore et du calcium.

Les besoins globaux du tournesol en éléments nutritifs sont comparables à ceux du maïs pour ce qui concerne l'azote et le phosphore et à ceux du colza pour les cations, potassium, magnésium et calcium.

## INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, on assiste en France au développement de la culture du tournesol. Ce développement a eu pour origine l'importation en provenance de l'U. R. S. S. de semences sélectionnées à haute teneur en huile. S'il a été quelque peu freiné par l'adaptation insuffisante de ces variétés aux conditions pédoclimatiques françaises, il a manifesté une reprise sensible avec l'apparition en 1969 du premier hybride de tournesol, l'*INRA 65-01*.

Les informations concernant les besoins en éléments nutritifs du tournesol sont peu nombreuses et sont souvent discordantes. L'objet de cette étude est donc d'ap-

porter des données complémentaires concernant l'une des variétés d'origine russe la plus cultivée : *Pérédovik* et le nouvel hybride *INRA 65-01*, placés l'une et l'autre dans de bonnes conditions culturales, en particulier dans un sol relativement bien pourvu en éléments nutritifs et peu sensible à la sécheresse en raison de sa profondeur et de sa richesse en colloïdes.

## MÉTHODES ET TECHNIQUES

Des prélèvements ont été effectués régulièrement au cours du cycle végétatif des 2 variétés. Ils ont porté exclusivement sur la partie aérienne des plantes, en raison des difficultés qui s'attachent à l'extraction d'une masse racinaire représentative, surtout dans un sol aussi argileux que celui de l'essai. Dans les échantillons ainsi récoltés, les divers organes ont été séparés, aboutissant à distinguer, en fin de cycle végétatif, les 5 fractions suivantes :

— les *tiges*
— les feuilles dont { les *pétioles* / les *limbes*
— les capitules dont { les *réceptables* (bractées incluses) / les *graines*

A chaque date de prélèvement et sur chacune des fractions séparées ont été effectuées les déterminations suivantes :

— Matière sèche à l'étuve à 85°C.
— N total par la méthode Kjeldahl.
— $P_2O_5$, $K_2O$, CaO, MgO et $Na_2O$ après calcination à 520°C et reprise des cendres à l'acide nitrique dilué.

Le produit du poids récolté par la composition de la matière sèche permet de déterminer à chaque date de prélèvement les quantités d'éléments minéraux présents dans les parties aériennes du tournesol.

## CARACTÉRISTIQUES PÉDOCLIMATIQUES

La culture a été réalisée sur le domaine de Crouelle (1), en 1970, en « Terre noire » de Limagne, profonde (1 m en moyenne), formée aux dépens de colluvions argilo-calcaires et d'alluvions granito-volcaniques en mélange. Le sol est argileux, nettement calcaire, normalement pourvu en matières organiques, largement en cations échangeables, mais un peu faiblement en phosphore comme l'attestent les analyses figurant au tableau 1.

En ce qui concerne le climat, la culture du tournesol a subi un été relativement chaud et beaucoup plus sec que la normale en juillet et septembre. Malgré ces sécheresses on a observé des pourritures du capitule sur 17 p. 100 et 15 p. 100 des plants non versés de *Pérédovik* et *INRA 65-10* respectivement.

La réserve en eau utilisable du profil (RU) est de l'ordre de 150 mm, mais la culture a bénéficié en outre de la présence d'une nappe phréatique oscillant entre 1 m et 1,60 m et accessible par les racines, qui a limité partiellement et temporairement les effets de la sécheresse climatique de juillet et même d'août, la demande en eau du tournesol se situant à un niveau particulièrement élevé.

(1) Domaine du Centre de Recherches agronomiques du Massif Central à Clermont-Ferrand (63).

TABLEAU I

*Analyses du sol*
(p. mille de terre fine sèche)

| Profondeur (cm) | 0-30 | 30-60 | 60-80 |
|---|---|---|---|
| Cailloux et graviers ..... | 0 | 0 | 0 |
| Granulométrie ; | | | |
| argile ..... | 399 | 239 | 173 |
| limon ..... | 324 | 362 | 233 |
| sables très fins ..... | 94 | 158 | 108 |
| sables fins ..... | 89 | 120 | 175 |
| sables grossiers ..... | 99 | 121 | 311 |
| Matières organiques totales | 30,2 | 19,6 | 12,0 |
| C/N | 8,8 | 9,0 | 10,9 |
| pH ($H_2O$) ..... | 8,1 | 8,3 | 8,6 |
| Calcaire total ..... | 212 | 272 | 278 |
| Cations échangeables $K_2O$ | 0,69 | 0,37 | 0,26 |
| Cations échangeables MgO | 2,58 | 3,60 | 3,57 |
| Cations échangeables $Na_2O$ | 0,10 | 0,21 | 0,36 |
| $P_2O_5$ (Joret-Hébert) ..... | 0,13 | 0,06 | 0,08 |

TABLEAU 2

*Caractéristiques climatiques mensuelles*
(Poste de Clermont-Mondésir, 1970)

| | (RU) | A | M | J | Jt | A | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pluies (en mm) .... | (≃ 150) | 34,1 | 92,0 | 73,2 | 18,6 | 63,5 | 4,5 |
| Jours de pluie ..... | | 13 | 8 | 10 | 4 | 9 | 4 |
| Température moy. . | | 9,0 | 13,4 | 18,8 | 18,8 | 19,4 | 17,6 |
| ETM (en mm) ..... | | 32 | 88 | 112 | 227 | 212 | 92 |

## CONDITIONS CULTURALES

*Précédent cultural :* Maïs-grain.

*Fertilisation.*

Une fumure complète à base d'engrais liquide ternaire a été enfouie un mois avant le semis à raison de 640 l/ha, soit une fumure/ha de 70 kg de N, 70 kg de $P_2O_5$ et 70 kg de $K_2O$.

*Semis.*

Le 4-5-1970 à raison de 6 kg de semences par ha distribuées en lignes espacées de 0,70 m.

*Traitements phytosanitaires.*

1° Avant semis, traitement au Dialate : 3,5 l de m.a. par ha ;

2° En préémergence, traitement à la Prométryne : 1,25 l de m.a. par ha ;

Le 28-6, une semaine après démariage, pose d'un filet de protection pour prévenir les dégâts par les oiseaux.

*Peuplement.*

Après la levée qui a débuté le 25-5, le démariage a été effectué le 20-6 de manière à réaliser un peuplement théorique de 57 000 pieds par ha (4 pieds au m linéaire).

*Observations phénologiques principales.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| | — 25-5 : début de la levée | | |
| | — 26-6 : apparition des premiers boutons floraux | (31 j | après levée) |
| (1)* | — 29-6 : bouton étoilé | (34 j | — ) |
| (2)* | — 20-7 : début floraison | (56 j | — ) |
| (3)* | — 30-7 : pleine floraison | (66 j | — ) |
| (4)* | — 20-8 : pleine fructification | (87 j | — ) |
| | — 29-9 : maturité (récolte) | (127 j | — ) |

Certains de ces stades physiologiques méritent d'être précisés. Nous entendons par les termes :

— bouton étoilé : le bouton floral est visible sur la moitié des plantes ;

— pleine floraison : la moitié des capitules est en fleur ;

— pleine fructification : la totalité des graines est distinctement visible sur 50 p. 100 des capitules ; stade atteint une dizaine de jours après la fanaison des derniers pétales de la moitié des inflorescences.

Si nous n'avons pas observé de décalages sensibles entre *INRA 65-01* et *Pérédovik* dans les dates moyennes mentionnées ci-dessus, l'hétérogénéité de la population du dernier est à l'origine d'un étalement de chaque phase devenant de plus en plus important vers la fin du cycle végétatif.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques qui permettent de mieux saisir la cinétique de la croissance et des prélèvements en éléments nutritifs.

(*) (1)-(2)-(3)-(4) Stades repères portés sur tous les graphiques.

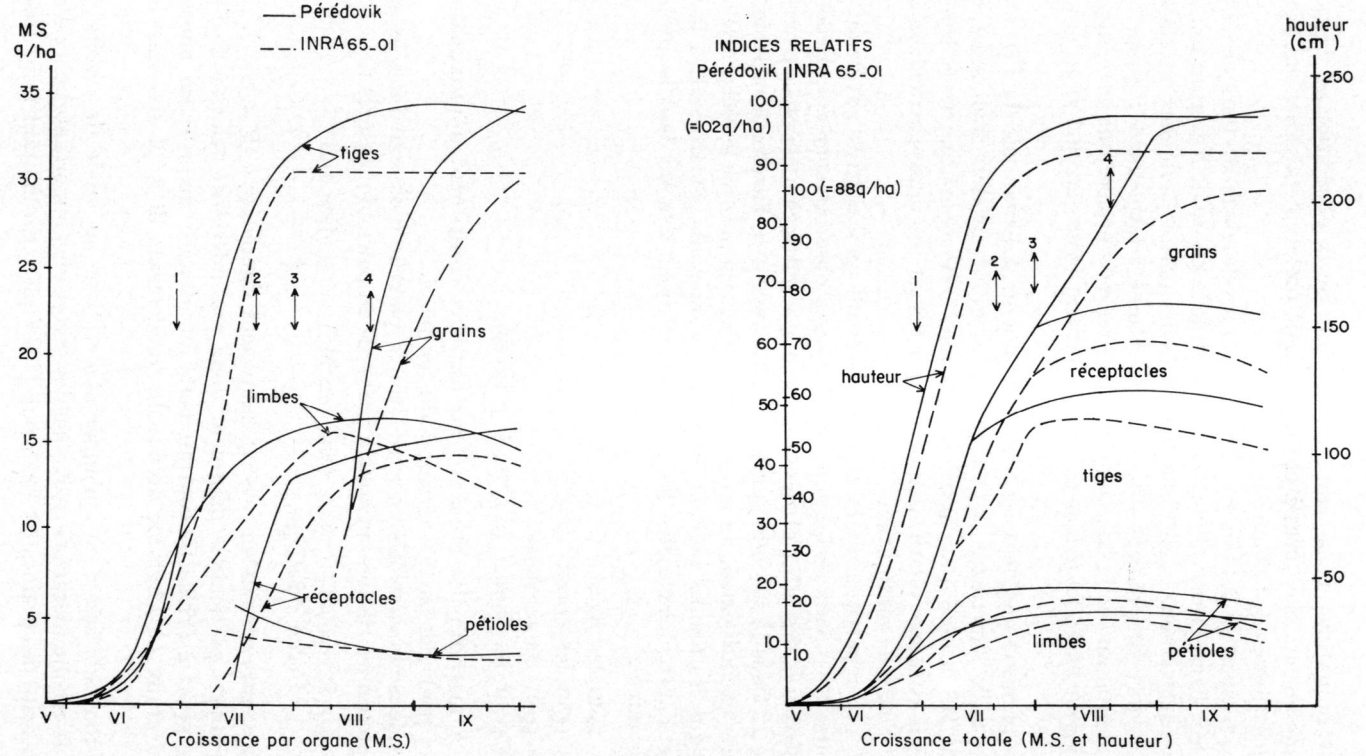



FIG. 1. — *Courbes de croissance*

### 1. — *Courbes de croissance* (fig. 1)

Les déterminations de la hauteur maximum de la population et du poids de matière sèche ont été effectuées à chaque date de prélèvement. Elles ont permis de construire les courbes de la figure 1.

L'accroissement de la taille est plus rapide que celui de la MS puisque les plantes atteignent leur hauteur maximum vers le début de la phase de fructification, époque à laquelle 75 p. 100 seulement de la MS finale des parties aériennes est élaborée.

La croissance proprement dite suit un rythme relativement régulier tout au long de la montaison sur la base moyenne de près de 3 g/pied/jour et de 2,5 g/pied/jour pour *Pérédovik* et *INRA 65-01* respectivement (soit encore 130 et 110 kg/ha/jour) (1).

La comparaison des deux variétés est toujours à l'avantage de *Pérédovik* qui atteint une taille supérieure (2,35 contre 2,20 m) et produit finalement environ 15 p. 100 de MS de plus que l'hybride. Bien que *Pérédovik* marque dès le départ de la montaison un avantage relatif, il apparaît que l'écart se creuse particulièrement au cours de la phase de maturation.

Quant à la répartition de la MS, on s'aperçoit qu'il n'existe pas de différences notables entre les 2 variétés puisque les décalages observés sont essentiellement le fait des différences des MS globales, ainsi que le montre clairement la partie droite de la figure 1. Dans la seconde moitié du cycle végétatif, l'accroissement de MS est dû à peu près exclusivement au grossissement du grain puisque le réceptacle ne grossit plus et que les feuilles perdent au contraire du poids. Finalement, à la récolte, chez l'une et l'autre des variétés, les organes participent à la MS dans les proportions simples suivantes :

— 1/3 pour les *tiges*
— 1/3 pour les *graines*
— 1/6 pour les *réceptacles*
— 1/6 pour les *feuilles* (limbes + pétioles)

Ainsi, à maturité, les organes fructificateurs constituent approximativement la moitié du poids des parties aériennes du tournesol.

Les rendements contrôlés en grains sur la parcelle d'où sont issus les prélèvements ont fourni les chiffres suivants à partir de 26 paires de mesures :

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Pérédovik* | 35,4 q/ha | (en MS) | (indice 100) |
| *INRA 65-01* | 30,7 — | — | ( — 87) |

La différence entre ces rendements est hautement significative ($P < 0{,}01$).

Ces résultats particuliers marquent donc une infériorité relative de l'hybride *65-01* par rapport à *Pérédovik*, contrairement aux données acquises sur une centaine d'essais culturaux où l'hybride accuse des rendements de 5 p. 100 supérieurs en moyenne.

Cette contradiction n'est qu'apparente et tient au mode de récolte dans la mesure où la récolte mécanisée provoque des pertes plus importantes chez *Pérédovik* dont la maturité des graines est beaucoup plus étalée. En limitant les pertes, le ra-

(1) Compte tenu des considérations discutées ci-dessous.

massage manuel qui a été pratiqué dans nos essais traduit cependant l'avantage de *Pérédovik* sur le plan de la productivité potentielle.

La correspondance entre les rendements en grain des parcelles et ceux obtenus à partir des prélèvements de plantes entières effectués à la récolte s'établit sur la base de peuplements théoriques (exprimés en plantes fictives semblables à celles qui ont été analysées) de :

44 230 pieds/ha pour *Pérédovik*
et 43 800 — *INRA 65-01*

Ces chiffres sont donc relativement concordants et montrent que l'échantillonnage n'a pas avantagé l'une des variétés par rapport à l'autre. Ils expriment la « perte de production » (23 p. 100) qui affecte nécessairement des ensembles de plantes hétérogènes par rapport aux valeurs absolues fournies par des prélèvements non représentatifs, car effectués à partir de pieds non exceptionnellement mais tous normalement développés. La recherche de prélèvements représentatifs aurait exigé, en effet, un grand nombre de pieds à chaque date d'intervention et aurait par trop modifié les conditions des peuplements effectifs, risquant finalement d'engendrer des conséquences encore plus graves.

D'autre part, les accidents de verse et surtout les attaques de Botrytis contribuent aussi à réduire la production, principalement au niveau du grain.

Malgré ces dernières affections plutôt spécifiques des organes reproducteurs, nous avons admis, faute de mesures précises, de conserver la participation relative de chaque organe à la matière sèche globale produite pour déduire les exportations minérales de la culture de plein champ à partir des prélèvements de plantes entières en appliquant une même réfaction dans le rapport de 57 000 à 44 000. L'échelle des rendements par ha de la figure 1 a été établie sur ces bases et conduit aux productions suivantes de matière sèche globale pour les parties aériennes :

| | | |
|---|---|---|
| *Pérédovik* | 102 q/ha | (indice 100) |
| *INRA 65-01* | 88 — | ( — 86) |

La production de MS par les racines peut être estimée à environ 10 q supplémentaires par ha, à partir des mesures effectuées par ROBELIN (1967) sur *INRA 65-01* cultivé en pots.

### 2. — *Absorption de l'azote* (fig. 2)

La teneur en azote total des divers organes séparés ne distingue pas sensiblement les deux variétés. Les décalages observés dans les courbes d'absorption reflètent donc essentiellement les différences de croissance.

La partie gauche de la figure montre clairement que les organes assimilateurs (principalement les limbes, mais aussi les tiges et les pétioles) commencent à présenter un bilan azoté déficitaire vers le début de la floraison en pleine phase de grossissement de l'inflorescence, bien entendu au bénéfice de cette dernière, plus spécialement du grain ; les limbes, par exemple, cèdent jusqu'aux 2/3 de leurs constituants azotés.

Les courbes cumulatives font apparaître une phase d'absorption de l'azote particulièrement active au cours de la montaison. Ainsi, pendant le mois qui précède la floraison, *Pérédovik* et *INRA 65-01* absorbent entre 3 et 4 kg de N/ha/jour, soit des quantités globales respectives de 100 et 90 kg/ha représentant 55 à 60 p. 100 des prélèvements totaux (racines exclues). Suit un ralentissement progressif bien que

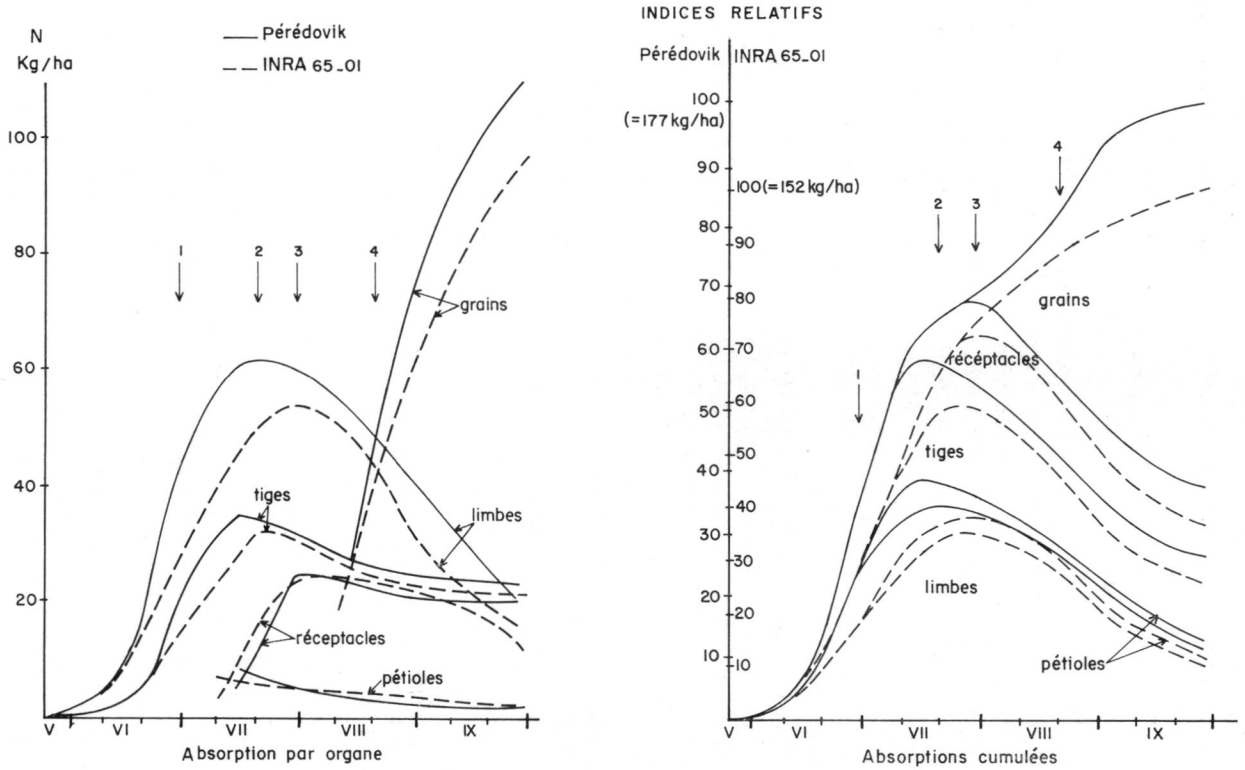



FIG. 2. — *Courbes d'absorption de N*

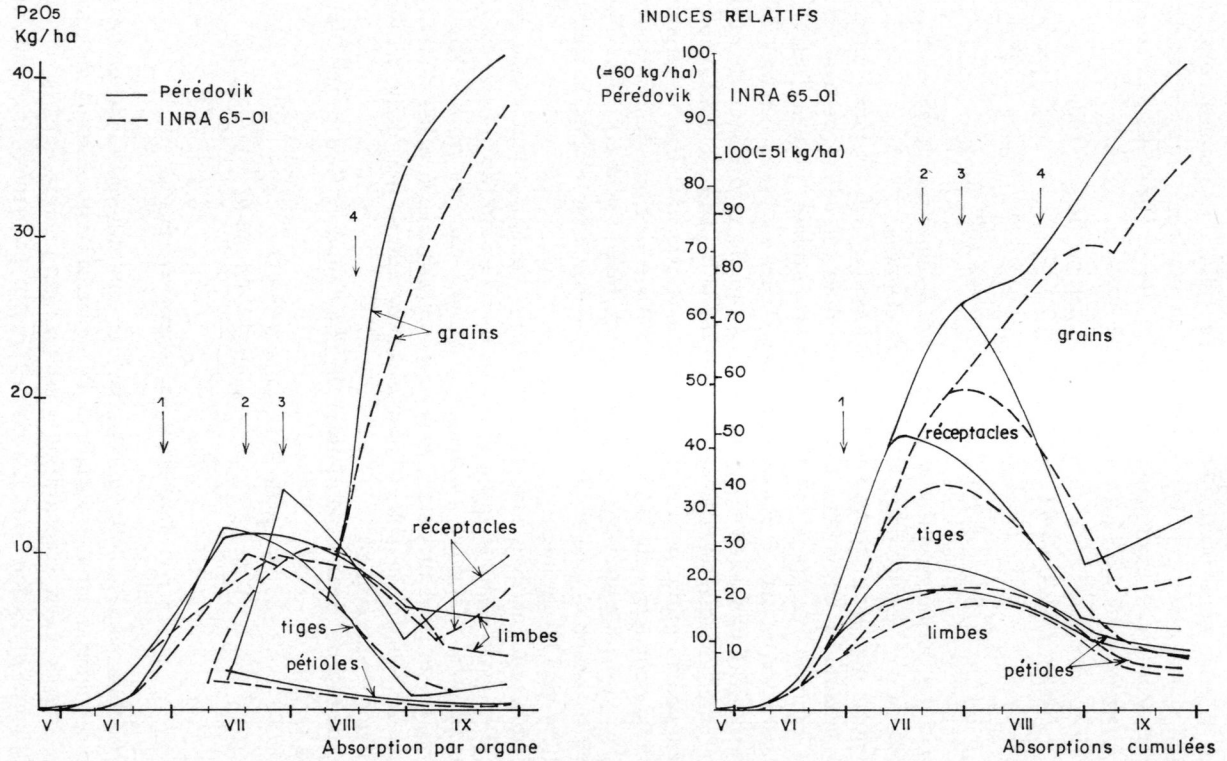



FIG. 3. — *Courbes d'absorption de P*

*Pérédovik* marque une reprise au début du grossissement du grain consécutive à la plus forte production de MS.

Finalement, à la récolte, on observe que les prélèvements de N sont à peu près proportionnels à la MS produite par chacune des variétés. Il en est ainsi, en particulier, pour le grain qui exporte 2,85 kg de N par quintal de graines à 9 p. 100 d'humidité, chiffre concordant avec les résultats de RADET (1962), mais supérieur à celui donné par BURON (1961). Contenant *plus de 60 p. 100 de l'azote des parties aériennes, les grains exportent* donc dans les conditions présentes :

pour *Pérédovik* 109 kg de N par ha (indice 100)
pour *INRA 65-01* 95 kg — ( — 87)

### 3. — *Absorption du phosphore* (fig. 3)

Là aussi, les décalages qui apparaissent sur la figure résultent essentiellement des différences de croissance entre les 2 variétés étudiées.

Plus encore que pour l'azote, une redistribution partielle du phosphore s'effectue à partir de la floraison qui voit les tiges et les feuilles « se vider » au bénéfice de l'inflorescence dont le réceptacle, partie-support des graines, présente une évolution singulière caractérisée par 3 phases distinctes. Dans un premier temps (phase de grossissement de l'inflorescence), le capitule accumule rapidement du phosphore. Après la fécondation, le réceptacle comme le reste de la plante se vide abondamment au seul bénéfice du grain, organe particulièrement exigeant. Enfin, au cours de la maturation du grain à laquelle correspond le ralentissement terminal de la croissance, le réceptacle s'enrichit à nouveau en phosphore, traduisant peut-être une « résistance » croissante à ce niveau et à ce stade physiologique du tournesol dans la translocation du phosphore vers les graines.

Les courbes cumulatives concrétisent bien cet enrichissement relatif des réceptacles en fin de cycle végétatif qui n'empêche pas cependant qu' *à la récolte 75 p. 100 environ du phosphore des parties aériennes se retrouve dans les graines*. Mais, comme pour l'azote, les 30 jours précédant la floraison constituent la phase d'absorption la plus intense au cours de laquelle le tournesol doit couvrir près de 50 p. 100 de ses besoins totaux en phosphore.

Les exportations finales par quintal de grain produit (à 9 p. 100 d'humidité) s'élèvent à :

1,10 kg de $P_2O_5$ pour *Pérédovik*
et 1,15 kg — pour *INRA 65-01*

### 4. — *Absorption du potassium* (fig. 4)

Les résultats sont ici plus fluctuants, car aux différences de croissance des 2 variétés se superposent des variations de concentrations surtout au niveau des organes végétatifs. Cette constatation n'est pas surprenante dans la mesure où le potassium représente, selon COÏC, LESAINT et GRANDJEAN (1963), un cation privilégié d'accompagnement lors de la migration des acides organiques à l'intérieur de la plante. Les principales irrégularités indépendantes de la MS formée concernent *les tiges où se trouve la majeure partie du potassium* et elles débutent avec la floraison. Il n'est donc pas exclu de penser qu'elles se manifestent à la fin de la sécheresse de juillet

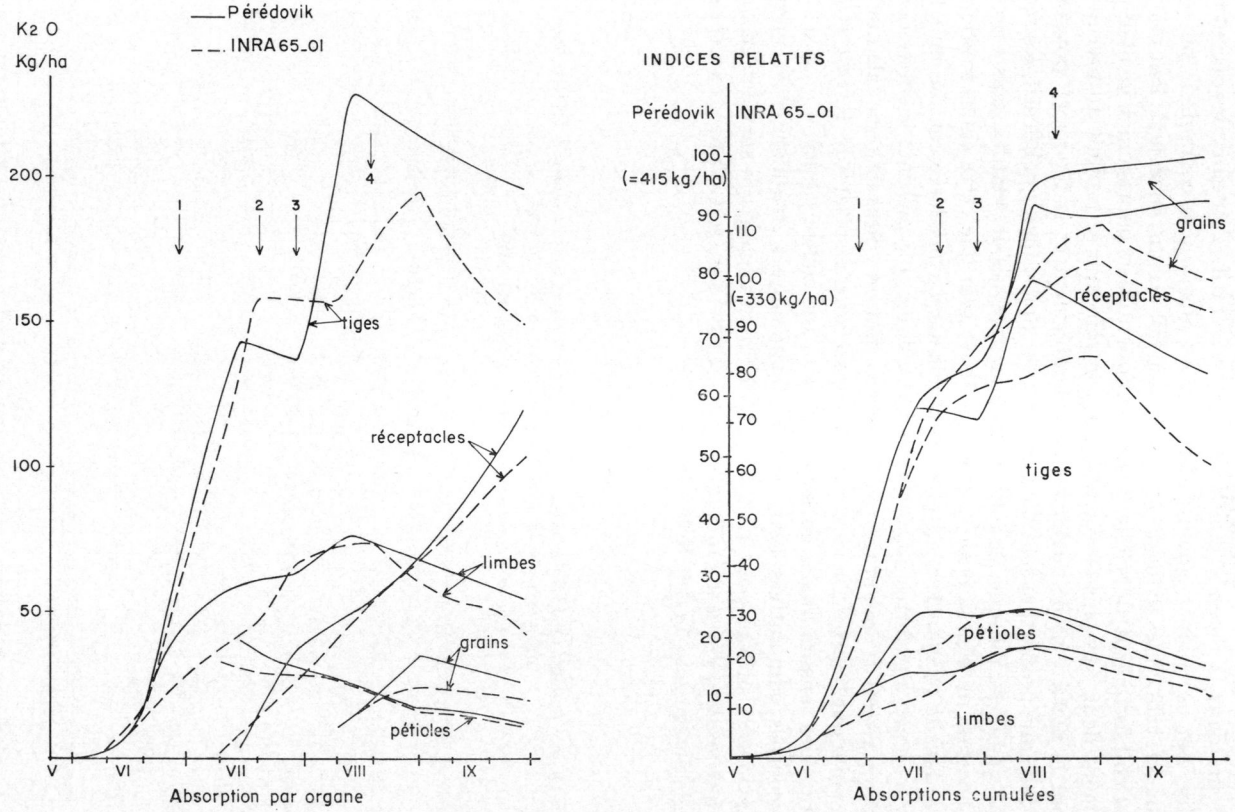



FIG. 4. — *Courbes d'absorption de K*

et qu'une reprise de l'absorption potassique s'effectue en août avce le retour de la pluie.

L'allure générale des courbes reste néanmoins significative des migrations de potassium qui s'effectuent des organes végétatifs (tiges et feuilles) vers les organes reproducteurs dans la seconde moitié du cycle végétatif. Toutefois, les réceptacles et les grains ont un comportement différent. C'est ainsi qu'au cours de la phase de maturation (cf. tabl. 3) les premiers marquent une faible croissance, mais leur matière sèche s'enrichit fortement, de telle sorte que leur quantité de potassium devient approximativement deux fois plus élevée. C'est le contraire qui se produit au niveau des grains dont la matière sèche augmente considérablement et la teneur en potassium diminue dans une proportion sensiblement inverse. Sur le plan qualificatif, les réceptacles sont singuliers, puisque, de tous les organes analysés, ils sont les seuls à présenter une élévation de leur taux de potassium. Il est vrai que cette concentration du potassium dans le réceptacle peut être éventuellement considérée comme un « luxe inutile » consécutif aux fortes disponibilités potassiques que présente le sol de l'essai, disponibilités attestées davantage par l'expérimentation culturale régionale que par l'analyse chimique. Surtout lorsqu'on la compare aux résultats de RADET (1962), qui rapporte des teneurs finales en $K_2O$ de 6,37 p. 100 contre 7,6 ici.

Les courbes cumulatives marquent évidemment ces irrégularités et mettent aussi en évidence, surtout pour *INRA 65-01*, le bilan négatif qui survient en fin de cycle et qui résulte, soit d'une migration vers les racines, soit d'une « exsorption » suivie de lessivage sous l'effet de la pluie.

TABLEAU 3

*Évolution des teneurs en cations minéraux des divers organes de l'hybride* INRA 65-01 *au cours de la phase de maturation des grains*

(en milliéquivalents pour 100 g de MS)

| | | Tiges | Pétioles | Limbes | Réceptacles | Grains |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pleine fructification (20-8) | Ca | 43 | 175 | 257 | 61 | 7 |
| | Mg | 84 | 168 | 144 | 35 | 20 |
| | K | 128 | 149 | 100 | 98 | 30 |
| | Na | ← traces → | | | | |
| | total | 255 | 492 | 501 | 194 | 57 |
| Maturité (29-9) | Ca | 40 | 170 | 328 | 64 | 7 |
| | Mg | 63 | 168 | 154 | 30 | 30 |
| | K | 104 | 91 | 83 | 168 | 15 |
| | Na | ← traces → | | | | |
| | total | 207 | 429 | 565 | 262 | 52 |

Sur le plan des conséquences agronomiques, il faut enfin retenir que la *plus grande partie* (*93 p. 100*) *du potassium absorbé revient au sol* par les résidus et que les grains exportent donc finalement de faibles quantités de $K_2O$, soit dans les conditions de l'essai, par quintal de grain produit à 9 p. 100 d'humidité,

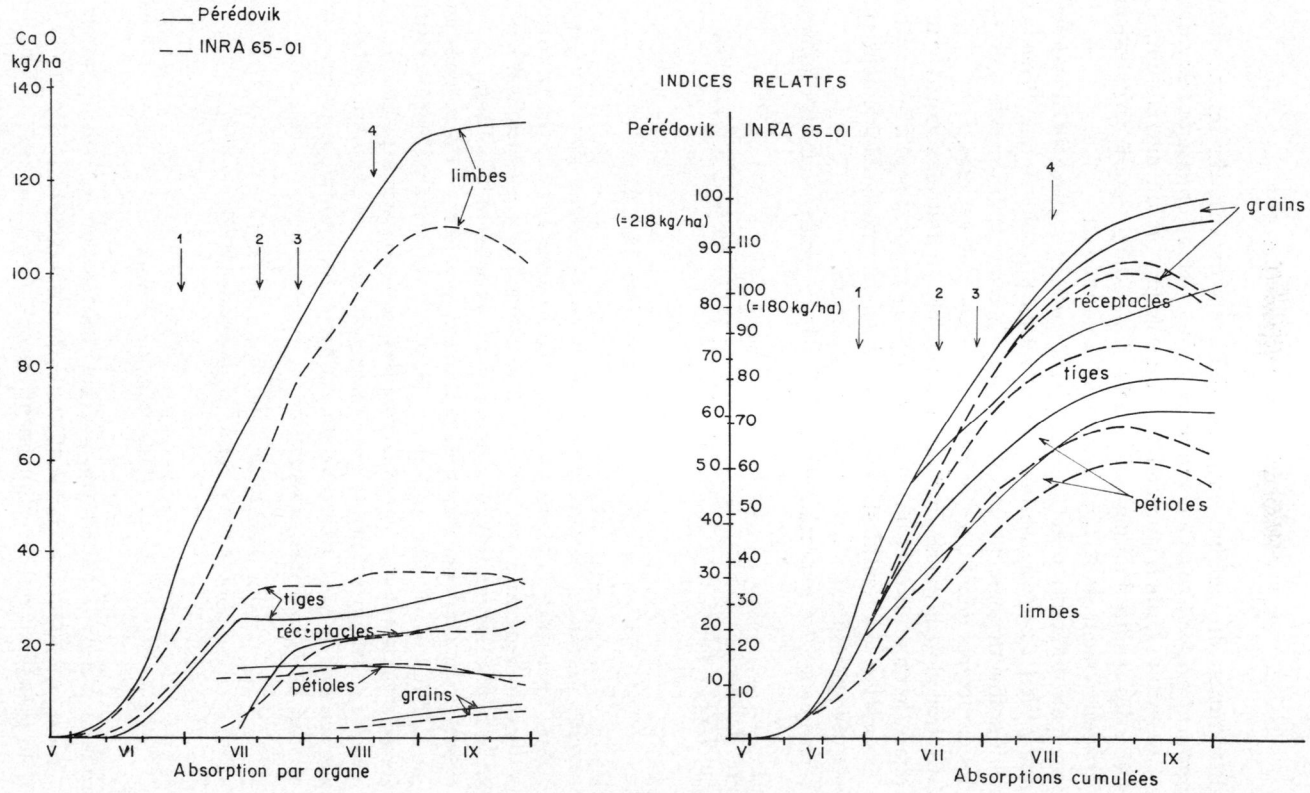



FIG. 5. — *Courbes d'absorption de Ca*

0,9 kg pour *Pérédovik*
et 0,8 kg pour *INRA 65-01*

### 5. — *Absorption du calcium* (fig. 5)

La distribution du calcium entre les différents organes du tournesol montre *la part largement prépondérante qui revient aux limbes* et à l'opposé *la très faible participation des grains*. L'abondance relative du calcium (et du magnésium) dans la matière sèche des feuilles indique, selon Coïc *et al.* (1963), que le métabolisme des anions (particulièrement de $NO_3^-$) s'accomplit à ce niveau.

La principale différence observée entre les 2 variétés se place au niveau des tiges où l'hybride *INRA 65-01* accuse une concentration plus élevée que *Pérédovik*. Elle témoigne d'un fonctionnement physiologique légèrement différencié qui pourrait résulter des caractères génétiques propres à chacune des variétés.

L'absorption globale du calcium par le tournesol apparaît régulière avec un maximum en phase de montaison et un ralentissement progressif jusqu'à la récolte encore qu'une « exsorption » se manifeste chez *INRA 65-01* vraisemblablement pour les raisons évoquées précédemment au sujet du potassium.

En conséquence, les exportations de CaO par les grains sont très faibles, c'est-à-dire :

pour *Pérédovik* 0,17
et pour *INRA 65-01* 0,15 } kg par quintal de grain à 9 p. 100 d'eau

### 6. — *Absorption du magnésium* (fig. 6)

*Les organes végétatifs constituent la localisation privilégiée du magnésium* dans la plante. Mais, à partir de la pleine floraison pour les tiges et de la fructification pour les limbes, ils commencent à « se vider » au bénéfice à peu près exclusif des grains, confirmant la facilité de migration du magnésium avec les métabolites.

On assiste ici à une concentration nettement plus élevée du magnésium dans les tiges de l'*INRA 65-01* par apport à *Pérédovik*, confirmant les observations et l'hypothèse se rapportant aux caractères génétiques évoquées à propos du calcium.

On retiendra finalement que *les grains ne représentent ici que 15 p. 100 du magnésium total absorbé* et que ces prélèvements, rapportés au quintal de grains (à 9 p. 100 d'eau) s'élèvent aux quantités suivantes :

pour *Pérédovik* 0,50 kg de MgO
et pour *INRA 65-01* 0,46 kg de MgO

### 7. — *Absorption du sodium*

Le sodium n'a guère été trouvé que dans les tiges où les concentrations diminuent de 4 à 0,5 p. 1 000 (en $Na_2O$) au cours du cycle végétatif. Malgré la richesse du milieu en potassium qui a certainement limité l'absorption du sodium, il semble qu'on puisse néanmoins considérer le tournesol comme une culture ne prélevant que de très faibles quantités de cet élément (au plus quelques kg de $Na_2O$ à l'ha).

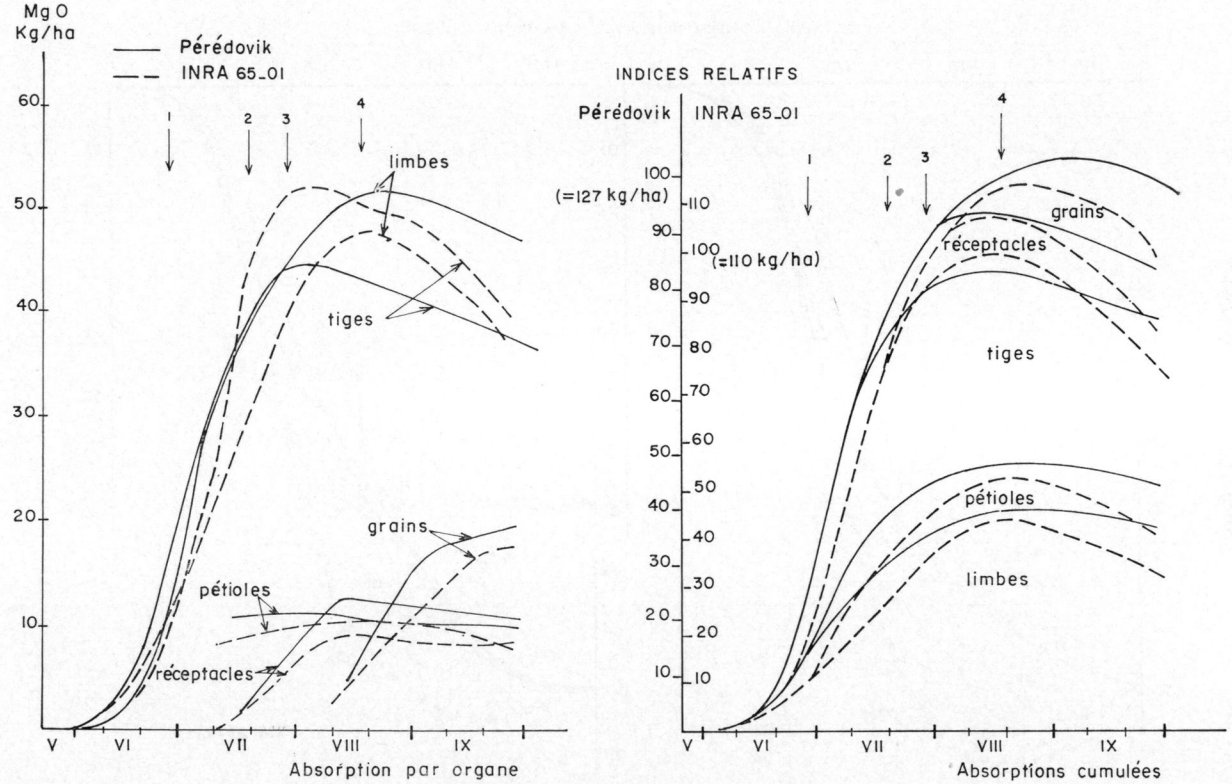



FIG. 6. — *Courbes d'absorption de Mg*

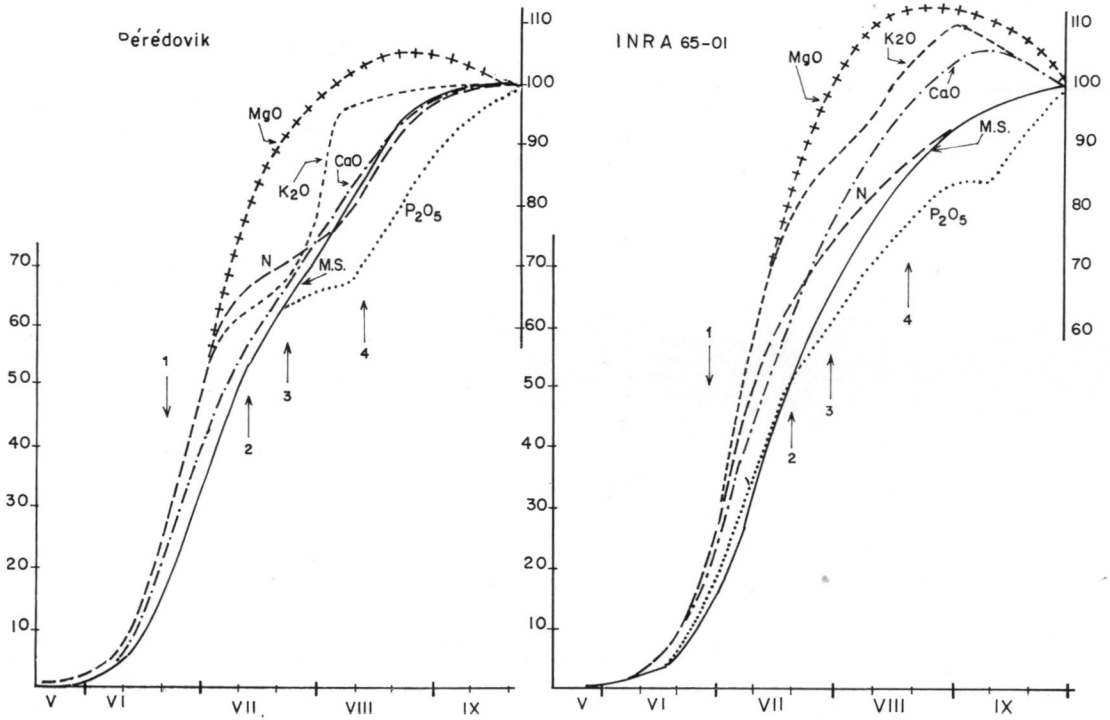



FIG. 7. — *Courbes d'absorption relatives cumulées*

### 8. — *Comparaison des rythmes de croissance et d'absorption relative*

Les courbes d'absorption tracées en fonction des quantités d'éléments trouvés dans les parties aériennes de la plante à la récolte (fig. 7) montrent les faits suivants :

— Au cours des 2 premiers mois de végétation, c'est-à-dire jusqu'à la floraison, tandis que le tournesol a élaboré environ les 2/3 de sa MS finale, il a absorbé les 9/10 du magnésium, les 3/4 du potassium (moyenne des 2 variétés) et des quantités d'azote, de phosphore et de calcium également proches des 2/3. *Cette période qui correspond essentiellement à la montaison représente donc une phase critique importante dans la nutrition minérale du tournesol* dans la mesure où elle conditionne le développement général de la plante, celui du capitule constituant un aboutissement.

— La situation se diversifie pendant la seconde moitié du cycle végétatif qui voit l'absorption du phosphore prendre du retard sur la croissance, conséquence probable d'un potentiel nutritif du sol insuffisant en cet élément malgré un apport par les engrais légèrement supérieur aux quantités prélevées par la plante. Par contre, les cations, le magnésium et le potassium surtout, demeurent largement abondants jusqu'à la phase de maturation marquée par l'« exsorption » déjà signalée.

— C'est d'ailleurs en fin de cycle qu'on observe les principales différences dans le comportement des 2 variétés. Il apparaît que l'hybride *INRA 65-01* a commencé à perdre plus rapidement ses cations sous l'effet probable d'une maturité légèrement plus précoce que celle de *Pérédovik* (bien que sur l'ensemble des 26 contrôles effectués dans le champ d'essai, l'humidité du grain à la récolte ne soit pas significativement différente entre les 2 variétés).

## CONCLUSIONS

Le tournesol est une plante à croissance rapide dont le cycle végétatif se poursuit sur une durée de 4 mois environ à partir de la levée dans le centre de la France, mais dont la phase vraiment active se limite à 2 mois de part et d'autre du début de la floraison. C'est donc une culture qui, comme le maïs, doit trouver dans le sol des disponibilités en éléments nutritifs assez abondantes, mais surtout facilement mobilisables.

En effet, le tableau récapitulatif n° 4 ci-dessous montre que les besoins globaux du tournesol sont comparables à ceux du maïs pour ce qui concerne l'azote et le phosphore, alors que les besoins en potassium, magnésium et calcium sont très supérieurs et voisins de ceux du colza, autre plante oléagineuse. En particulier, les prélèvements de magnésium sont ici extrêmement élevés et sont certainement liés à la richesse du sol en cet élément. Ils ne peuvent donc pas être pris pour référence, surtout quand on les compare à d'autres données régionales (30 à 60 kg par ha) ou étrangères (77 kg par ha selon ROBINSON (1970)).

Du fait que la récolte mécanique laisse sur le sol la totalité des organes autres que les graines, les exportations définitives sont modestes. On retiendra donc que si le tournesol demande un bon niveau de fertilité chimique capable d'assurer en peu de temps des besoins nutritifs élevés, il constitue, par contre, une culture peu épuisante par elle-même et comparable en cela au maïs. Dans le calcul des bilans minéraux

indispensables à la détermination de la fumure d'entretien, on n'oubliera pas, cependant, d'inclure les pertes par drainage, qui affectent d'autant plus les éléments mobiles du sol (nitrates, sulfates, calcium, magnésium et potassium) que les parcelles destinées aux cultures d'été restent à nu pendant les périodes pluvieuses de l'hiver et du printemps.

TABLEAU 4

*Prélèvements comparés du tournesol, du maïs et du colza*
(en kg par ha à la récolte)

| | | MS | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | CaO | MgO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tournesol | Plante entière | 9 000 | 150 | 60 | 350 | 200 | 120 |
| | Grain | 3 000 | 95 | 40 | 25 | 6 | 15 |
| Maïs grain | Plante entière | 11 000 | 150 | 60 | 130 | 30 | 25 |
| | Grain | 6 500 | 100 | 50 | 35 | 2 | 15 |
| Colza | Plante entière | 9 000 | 225 | 100 | 300 | 220 | 40 |
| | Grain | 3 000 | 125 | 55 | 30 | 20 | 15 |

(Chiffres tirés de l'expérimentation agricole dans le même milieu cultural.)

Les chiffres recueillis confirment et expliquent les résultats fournis par l'expérimentation culturale (ROLLIER, 1971), qui fait du tournesol une plante réagissant modérément à la fumure minérale azotée, avec un optimum actuellement voisin de 50 kg par ha en sol de niveau humique normal et moyennement profond et constituant un bon précédent cultural. On peut néanmoins penser qu'en améliorant la résistance à la verse, la sélection autorisera l'emploi de fumures azotées de plus en plus abondantes, suivant en cela l'évolution qu'a connue la culture du maïs et qui aboutira à accroître progressivement les exportations en éléments minéraux.

*Reçu pour publication en mars 1972.*

## SUMMARY

KINETICS OF ABSORPTION OF THE CHIEF NUTRIENTS IN THE SUNFLOWER

Absorption of nutrients in the Sunflower was observed throughout the vegetative cycle by sampling the aerial part. The new hybrid, *I. N. R. A. 65-01* has been compared with *Pérédovik*.

A fast-growing plant, the Sunflower takes most of the nutrients it requires, during the two months straddling its initially flowering period, in the following proportions :

9/10 of magnesium,
3/4 of potassium,
2/3 of calcium, nitrogen and phosphorus.

The total nutritional needs of the Sunflower are comparable with those of maize as regards nitrogen and phosphorus, and with those of rape-seed for cations, potassium, magnesium and calcium.

## ZUSAMMENFASSUNG

### DIE KINETIC DER ABSORPTION DER WICHTIGSTEN NÄHRSTOFFE BEI DER SONNENBLUME

Die Absorption der Nährstoffe durch die Sonnenblume wurde während des ganzen Wachstumszyklus hindurch mittels Probenahmen aus der Luftbestandteilen der Pflanze genau beobachtet. Das neue Hybrid *I. N. R. A. 65-01* wurde mit dem *Pérédowik* verglichen.

Als rasch wachsende Pflanze entnimmt die Sonnenblume das Wesentliche ihrer Nährstoffen im Laufe einer zweimonatlichen Periode, welche die Blütezeit einfasst ; nämlich :

9/10 des Magnesiums,
3/4 des Kaliums,
2/3 des Stickstoffes, des Phosphors und des Calciums.

Was den Stickstoff und den Phosphor anbetrifft, sind die Gesamtbedürfnisse der Sonnenblume an Nährstoffen vergleichbar mit jenen des Mais, und was die Kationen, das Kalium, das Magnesium und das Calcium anbetrifft, mit jenen des Rapses.

## РЕЗЮМЕ

Кинетика поглощения подсолнечником главных питательных элементов.

Л. ГАШОН.

На образцах надземных частей подсолнечника, взятых на анализ, прослеживалось поглощение питательных элементов этим растением в течении всего его растительного цикла. Сравнивались новый гибрид ИНРА 65-01 и советский сорт Передовик. Изучение это показало что главная часть питательных элементов (9/10 магния, 3/4 калия и 2/3 азота, фосфора и кальция) изымаются подсолнечником — растением развивающимся очень быстро, из почвы, в течении двухмесячного периода предшествующего цветению.

Суммарные потребности подсолнечника в главных питательных элементах можно приравнить к потребностям кукурузы в отношении азота и фосфора и раиса — в отношении катионов (калий, магний и кальций).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Buron P., 1961. Étude des besoins du tournesol en éléments fertilisants. *C. R. Trav. Stations agron., I. N. R. A.*

Coïc Y., Lesaint Chr., Grandjean M., 1963. Sur la composition minérale des espèces et organes végétaux et leur déterminisme. *Ann. Physiol. vég.*, **5**, 293-301.

RADET E., 1962. Étude chimique du tournesol. *Bull. Assoc. fr. Ét. Sol*, 5.

ROBELIN M., 1967. Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. *Ann. agron.*, **18**, 579-599.

ROLLIER M., 1971. Étude de la fertilisation du tournesol. *Inform. tech. CETIOM*, **24**, 1-22.

ROBINSON M., 1970. Sunflower date of planting and chemical composition at various growth stages. *Agron. J.*, **62**, 665-666.

STATION AMÉLIORATION DES PLANTES, Clermont-Ferrand, 1970. *C. R. essais tournesol.*

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 567-576.

NOTE TECHNIQUE

# SOLS FLOTTANTS ARTIFICIELS POUR CULTURES EXPÉRIMENTALES

H. BOUTIÈRE

*Station lagunaire de Sigean-Bellevue,*
*Laboratoire « Arago »,*
*66 - Banyuls-sur-Mer*

## RÉSUMÉ

Un dispositif de germination et de culture sur un substrat artificiel constitué par des particules de polystyrène expansé flottant sur une solution nutritive, a été mis au point à l'occasion d'expériences sur des enceintes biologiques solaires.

La circulation et l'aération sont réalisées au moyen de pompes statiques simples, actionnées par l'air comprimé ou le vide. Le principal résultat de ce système de culture est l'apparition sur le système radiculaire d'une gangue de particules de polystyrène qui rend le repiquage des jeunes plants extrêmement facile. Le procédé peut également servir pour des cultures de longue durée en bacs étanches. Dans certains cas, ce substrat flottant artificiel peut évoluer vers un sol flottant biologique.

## INTRODUCTION

L'expérimentation de serres-distillateurs au Centre d'Écologie Méditerranéenne du Laboratoire Arago, à Banyuls-sur-Mer, a conduit à rechercher un substrat de cultures hydroponiques permettant un repiquage facile des jeunes plants devant être transférés sur sable ou sur gravier dans l'enceinte solaire.

Plusieurs chercheurs ayant été intéressés par le procédé, il nous semble utile d'en donner la description, bien que l'utilisation que nous en avons faite, soit déjà ancienne. Il peut être utilisé dans les laboratoires de recherche agronomique ou de physiologie végétale, ainsi que par les pépiniéristes et les amateurs avertis.

## I. — AVANTAGES DE LA GERMINATION SUR SOL FLOTTANT ARTIFICIEL

Un substrat imputrescible et bon marché a été réalisé à partir de plaques de polystyrène expansé de type commercial. Ce produit, actuellement très utilisé pour l'emballage et l'isolement, se présente sous la forme de grains ou sphérules plus ou moins irréguliers, de tailles diverses, adhérents entre eux. La densité est extrêmement faible, de l'ordre de 0,1. Il est facile de briser et de broyer à la main, des plaques ou des débris de polystyrène expansé et de les réduire en fragments constitués chacun par un petit nombre de sphérules élémentaires, ou même d'arriver à des sphérules isolées. La matière prend alors l'aspect d'une sorte de gravier blanc excessivement léger, doué de propriétés électrostatiques notables d'ailleurs gênantes pour sa manipulation à sec.

Le polystyrène expansé commercial est obtenu par chauffage modéré de la matière brute, livrée en glomérules bien calibrés. Il est possible de se procurer le produit brut en usine. Nous ne l'avons, cependant, jamais utilisé sous cette forme.

Un des buts recherchés au cours de l'expérimentation des serres à distillation solaire, était l'utilisation maximale du sol dans une succession de cycles de culture courts. Les serres-distillateurs solaires (fig. 1) sont des enceintes de culture dont le principe a été proposé par FOEX et TROMBE et mis en œuvre par l'auteur, au Centre d'Écologie Méditerranéenne de Banyuls-sur-Mer (FOEX et TROMBE, 1958 ; BOUTIÈRE, 1969).

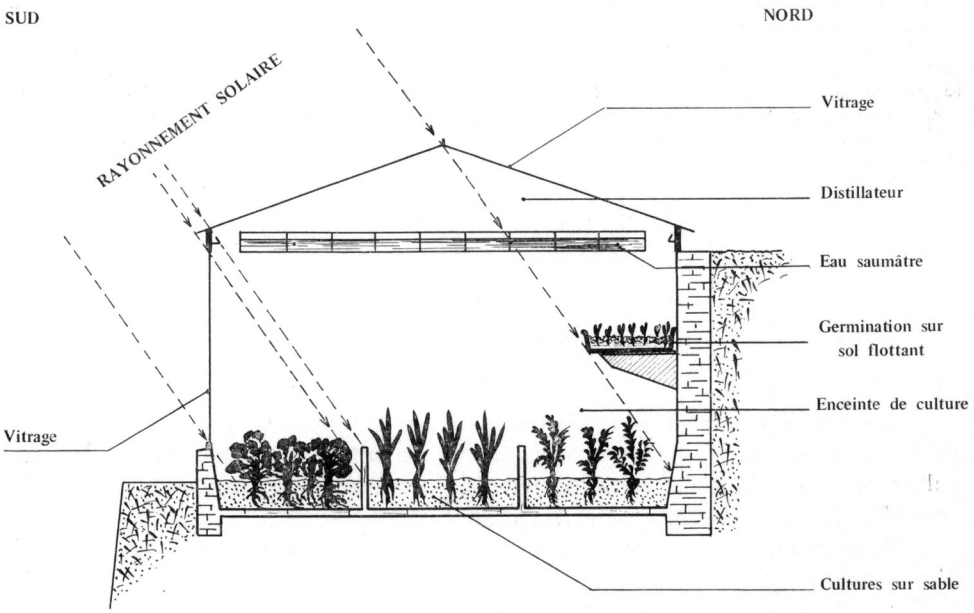



FIG. 1. — *Coupe schématique de la serre-distillateur solaire de Banyuls-sur-Mer, avec son dispositif de germination sur sol flottant*

Sous le vitrage du toit, un système de bassins plats contenant de l'eau saumâtre ou marine est chauffé par le rayonnement solaire. La vapeur produite se condense sur les vitres et l'eau obtenue, additionnée de sels nutritifs sert à l'irrigation des cultures pratiquées dans la même enceinte.

Il importait de n'utiliser le sol que pour la croissance finale de plantes qui avaient germé et avaient parcouru les premiers stades de leur développement dans des bacs de faible surface, dans lesquels la densité du peuplement pouvait être très grande. Ainsi, pendant qu'une récolte arrivait à son terme sur le sol de la serre, la récolte suivante avait déjà levé dans les bacs de première croissance placés dans ou hors de l'enceinte solaire, mais toujours de façon à ne pas diminuer la surface utile du sol de la serre.

## II. — DESCRIPTION DE L'INSTALLATION (fig. 2)

### 1. — *Bacs de culture*

Les bacs de première croissance sont, soit des bacs parallépipédiques, transparents, du modèle standard du Laboratoire Arago (60 × 30 × 22 cm en métacrylate de méthyle moulé) soit des bacs plats destinés aux tirages photographiques sur grands formats (75 × 50 × 10 cm) en matière plastique opaque. Le système de culture employé est la solution hydroponique en circuit fermé, aérée, à niveau constant.

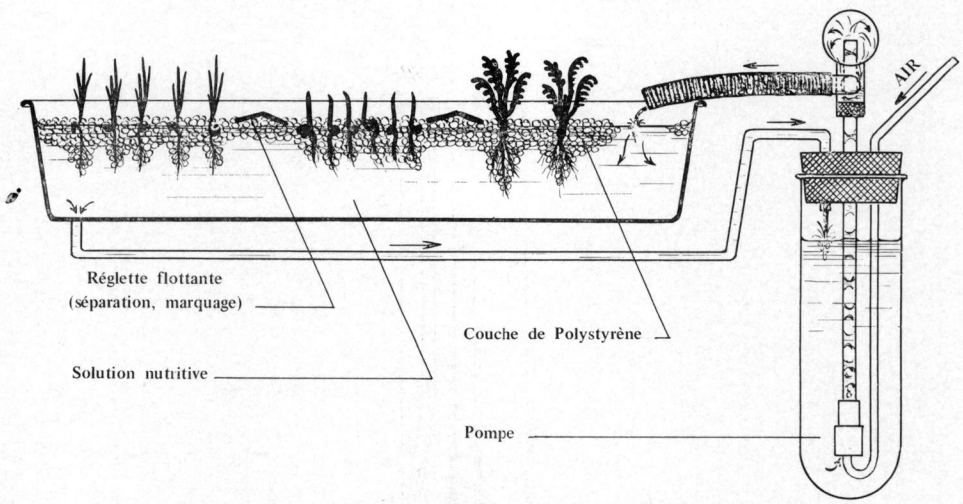



FIG. 2. — *Dispositif de culture sur sol flottant de polystyrène expansé, avec pompe de circulation à air pulsé*

### 2. — *Substrat*

Chaque bac est rempli sur une hauteur de 5 à 10 cm, d'une solution nutritive convenable. Une couche de 3 cm de polystyrène (1) expansé broyé est répandue à la surface de la solution et mouillée avec cette solution. Même après humectation, la flottabilité du polystyrène reste remarquable. La partie superficielle de la couche sèche rapidement, tandis que la masse constitue une

(1) Il est prudent de ne pas employer de polystyrène teinté qui peut contenir un colorant toxique.

sorte de sol spongieux et très aéré qui reste indéfiniment humide. C'est dans ce substrat flottant que sont déposées les graines qui doivent germer. La solution nutritive peut être extraite du bac par une tubulure installée au fond de celui-ci.

### 3. — *Pompe à air pulsé*

L'aération et la circulation de la solution nutritive sont assurées par un système de pompage statique à air pulsé (fig. 3).

La pompe est constituée par un tube éprouvette sans bec, à fond rond (*a*) de 5 cm de diamètre et 25 cm de profondeur dont l'ouverture, tournée vers le haut, est close par un bouchon en caoutchouc à trois trous. Un premier trou laisse passer une tubulure (*b*) qui est reliée du fond du bac de culture et qui permet le remplissage de (*a*) par gravité. L'élément principal de la pompe est constitué par un tube vertical en verre (*c*) de 6 mm de diamètre intérieur qui part de 5 cm du fond du tube éprouvette, traverse le bouchon et s'élève au dessus du niveau du bord du bac de culture. De l'air comprimé à basse pression est insufflé à la base de ce tube vertical par un tuyau en matière plastique semi-rigide (*d*), qui traverse le bouchon par le troisième trou et qui est maintenu en place par deux ou trois morceaux de tubes de diamètres croissants (*e*) emboîtés les uns dans les autres. L'air comprimé peut être fourni par un petit appareil à lame vibrante du genre « Belbul », lorsque l'installation de chaque bac à sol flottant doit être indépendante. Un compresseur mécanique peut être plus avantageux lorsqu'un nombre assez élevé de bacs à sol flottant doit fonctionner ensemble.

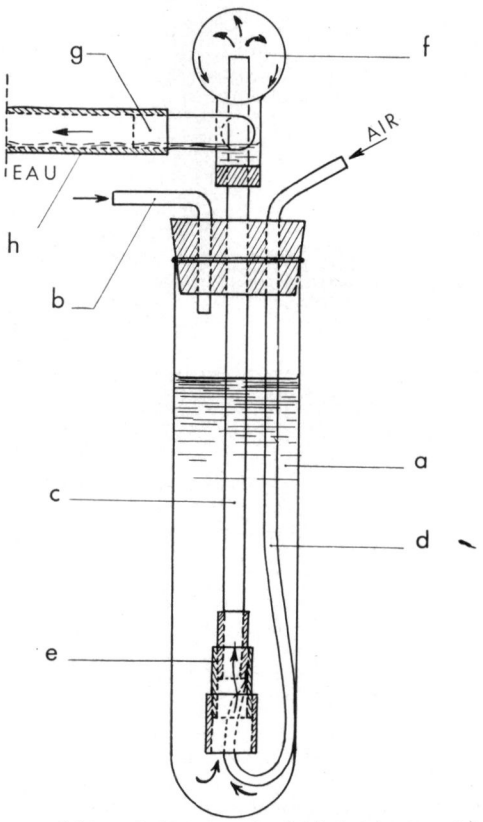



FIG. 3. — *Schéma de la pompe à circulation à air pulsé*

L'air insufflé forme des bulles qui montent rapidement dans le tube vertical (*c*) et entraînent avec elles, une quantité notable de liquide. L'extrémité supérieure du tube vertical est engagée dans un petit accessoire en verre ou en matière plastique constitué par une sphère (*f*) de 3 à 4 cm

de diamètre munie d'un col cylindrique assez large, qui porte lui-même, latéralement, un tube coudé (*g*). Cet accessoire est peu commun dans la verrerie de laboratoire, mais il est fabriqué en grande série pour le commerce et vendu très bon marché pour le dosage des boissons.

Les bulles d'air et la solution entraînée parviennent dans la sphère en verre (*f*), le liquide se rassemble dans son col droit et s'écoule par le tube coudé (*g*), prolongé par un tuyau en caoutchouc d'assez gros diamètre (*h*) qui sert également à la sortie de l'air. Ce tuyau ramène la solution nutritive bien aérée en un point quelconque du bac de culture, si possible à l'opposé de la tubulure de départ.

### 4. — *Pompe à dépression*

Il peut parfois être intéressant de disposer d'un procédé de circulation et d'aération des solutions du sol n'utilisant pas le courant électrique, notamment dans les régions où les pannes sont fréquentes.

Un système que nous avions mis au point à l'Institut des Pêches maritimes du Maroc en 1956 pour l'alimentation de secours d'aquariums marins en circuit fermé peut être adapté aux cultures sur sol flottant. Il fait appel à la dépression produite par une pompe à vide branchée sur un robinet d'eau courante.

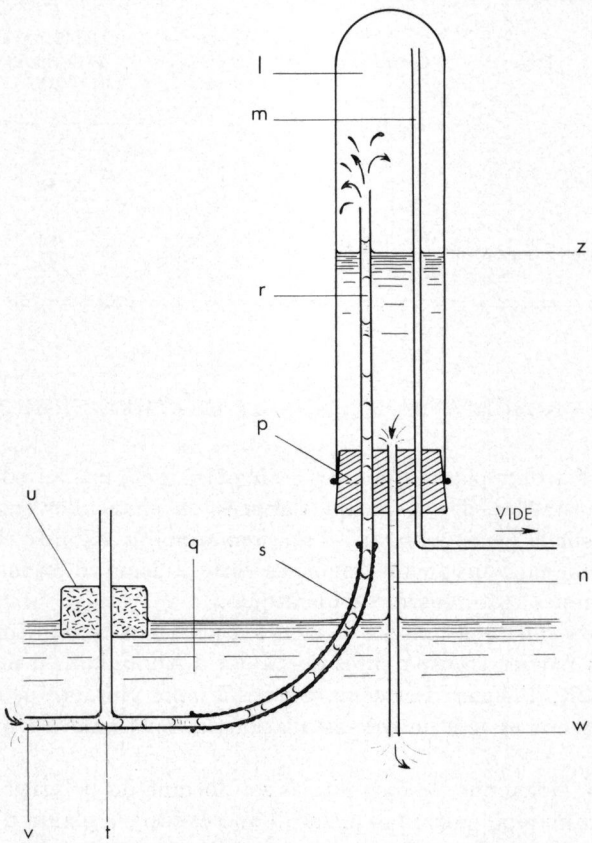



FIG. 4. — *Schéma de la pompe à circulation à dépression*

Il peut être monté (fig. 4) à partir d'un tube éprouvette (*l*) semblable à celui de la figure 3, fermé par un bouchon à trois trous, mais en position inversée. Un tube de verre (*m*) pénètre jusqu'au fond du tube (*l*) et se trouve relié à une trompe à vide. Un tube (*n*) affleurant à la face interne du bouchon (*p*) plonge dans le liquide (*q*) qu'il s'agit d'aérer et de faire circuler. Un troisième tube (*r*) s'élevant à peu près à mi-hauteur dans le tube (*l*) est prolongé par un tuyau souple (*s*) à

l'extrémité duquel s'engage une des branches latérales d'un T en verre (*t*) dont la branche centrale est munie d'un petit flotteur (*u*) maintenant le T à la surface du liquide. La dépression qui règne en (*l*) fait d'abord monter le liquide (*q*) par (*n*) et un mélange d'air et de liquide (bulles) par le tube (*r*). Le niveau du liquide dans (*l*) se stabilise à une certaine hauteur (*z*) et à partir de ce moment, tout le liquide qui continue à être entraîné avec les bulles dans le tube (*r*) s'écoule par le tube (*n*). L'entrée (*v*) et la sortie (*w*) de cette pompe à dépression peuvent être dans des récipients différents.

La théorie peut être établie à partir de la densité du liquide et de sa densité apparente dans le tube (*s*) mais ne présente guère d'intérêt pratique.

### 5. — *Vitesses de circulation des solutions*

Le tableau ci-après indique les débits moyens mesurés pour les deux types de pompes qui viennent d'être décrites. Les dimensions sont celles indiquées dans le texte. Dans le cas de la pompe à air pulsé, la consommation est l'énergie électrique absorbée par l'aérateur « Belbul » 220 volts. Pour la pompe à dépression, la consommation est le débit d'eau dans la trompe à vide qui l'actionne.

| Type | Consommation | Hauteur d'élévation (cm) | Débit moyen de la solution (l/h) |
|---|---|---|---|
| Pompe à air pulsé | 2 watts | 10 | 18 |
| | 2 watts | 15 | 12 |
| Pompe à dépression | 100 l/h | 10 à 20 | 16 |
| | 200 l/h | 10 à 20 | 24 |

## III. — RÉSULTATS OBTENUS EN CULTURE TEMPORAIRE

Le dispositif à bacs plats et pompes à air pulsé a été mis au point et utilisé par nous à Banyuls-sur-Mer, il y a quelques années, en particulier entre 1963 et 1966, et s'est révélé, sur le plan technique, d'une remarquable fiabilité (BOUTIÈRE, 1972).

Le montage n'exigeant aucun travail du verre à chaud, il est facile de construire une série de pompes rigoureusement identiques.

Les éléments sont bon marché et faciles à nettoyer. Si on a pris la précaution de recouvrir les parties transparentes de papier d'aluminium, il ne se développera pas, pratiquement, d'algues. Les compresseurs à lame vibrante peuvent rester sous tension indéfiniment et une de ces installations a fonctionné 19 mois sans aucune intervention.

Sur le plan biologique, le dispositif à sol flottant de polystyrène a donné des résultats parfaits au repiquage : 100 p. 100 de succès sur 384 plants d'espèces diverses transférés en plusieurs mois, du sol flottant aux bacs de sable inerte (quartz) en subirrigation automatique de la serre-distillateur solaire.

Le système radiculaire des végétaux qui avaient germé et s'étaient développés pendant plusieurs semaines sur sol flottant de polystyrène, pouvait être extrait à peu près intact de ce substrat, mais il est apparu un avantage fondamental : les radicelles agglomèrent une véritable gangue de fragments de polystyrène de toutes tailles

et cette gangue est entraînée à l'arrachage avec le chevelu radiculaire. L'agglomération de particules de polystyrène, intimement imprégnées de solution nutritive, formant un emballage élastique, véritable parenchyme externe, assurent une protection mécanique très efficace et surtout maintiennent les poils absorbants dans un milieu aqueux idéal pendant de longues heures.

Il en résulte que les plants extraits du sol flottant de polystyrène où ils ont poussé, peuvent demeurer une journée entière à l'air libre sans se flétrir et sans que leurs chances de reprise dans un nouveau milieu se trouvent compromises. Le travail de repiquage, toujours fastidieux, peut donc être fait sans hâte ou en tenant compte d'impératifs horaires extrabiologiques.

La gangue de polystyrène adhérente aux racines est enterrée dans le nouveau milieu. Dans nos expériences, il s'agissait de sable de silice concassé. Le polystyrène imprégné de la solution nutritive originelle assure dans l'immédiat, la transition chimique avec le nouveau liquide d'irrigation offert aux plantes repiquées : eau d'irrigation ou solution saline d'une autre formule. Ensuite, la gangue qui a tendance à se désagréger, contribue à alléger, mécaniquement, le nouveau sol au contact des radicelles.

## IV. — CULTURES DE LONGUE DURÉE ET MODIFICATIONS DE L'INSTALLATION

Le système à sol flottant de polystyrène a été mis au point pour la germination de végétaux devant être repiqués. Il peut être aussi utilisé pour maintenir en culture indéfinie, des végétaux aériens.

L'expérience a montré que le système radiculaire pouvait se développer parfaitement dans le sol flottant artificiel et dans la solution nutritive, notamment contre le fond du bac. Pour ce type d'utilisation, il est préférable d'avoir un bassin à parois opaques. La couche de polystyrène est, en ce qui concerne la lumière visible, pratiquement opaque à partir de 3 cm d'épaisseur.

Des graines de *Parietaria officinalis* ayant germé spontanément dans des bacs à sol flottant avec d'autres plantes, plusieurs pieds ont été conservés en place. Ils ont vécu deux ans et demi dans ce milieu, d'une façon parfaitement normale, fleurissant et fructifiant deux fois chaque année, abondamment, et donnant des graines fertiles. Ces *Parietaria* ont été ensuite, transplantés sur sable, dans l'enceinte solaire et ont prospéré encore une année, jusqu'à l'arrêt de l'installation ce qui est une preuve de leur bonne santé physiologique dans les conditions de culture qui leur étaient offertes.

Le substrat flottant de polystyrène tend à perdre son caractère de support inerte pour trois raisons : des algues vertes ou des cyanophycées peuvent se développer à sa surface, des débris des plantes cultivées peuvent s'accumuler et enfin des poussières extérieures peuvent le souiller.

Si on veut conserver le caractère inerte du substrat, il est facile de poser à sa surface un film de polyéthylène percé de trous ou de fentes et traversé par les tiges des végétaux cultivés. Si ce film est noir (produit agricole), le développement des algues est aussi supprimé. Il peut être commode d'utiliser à la place du film de poly-

éthylène noir, des feuilles de matière plastique noire gauffrée et flottante qui servent à recouvrir les piscines particulières.

Enfin, une autre modification de l'installation permet le passage de la culture en hydroponique sur sol flottant, à la culture sur substrat meuble irriguée par percolation ou autrement. Le montage reste le même que celui qui a été décrit, mais on dispose au fond du bac, d'une couche de matériaux meubles tels que du sable (fig. 5). Le sable est imprégné, puis recouvert par la solution de culture à la surface de laquelle est répandu le polystyrène. Les graines sont semées comme il a été dit

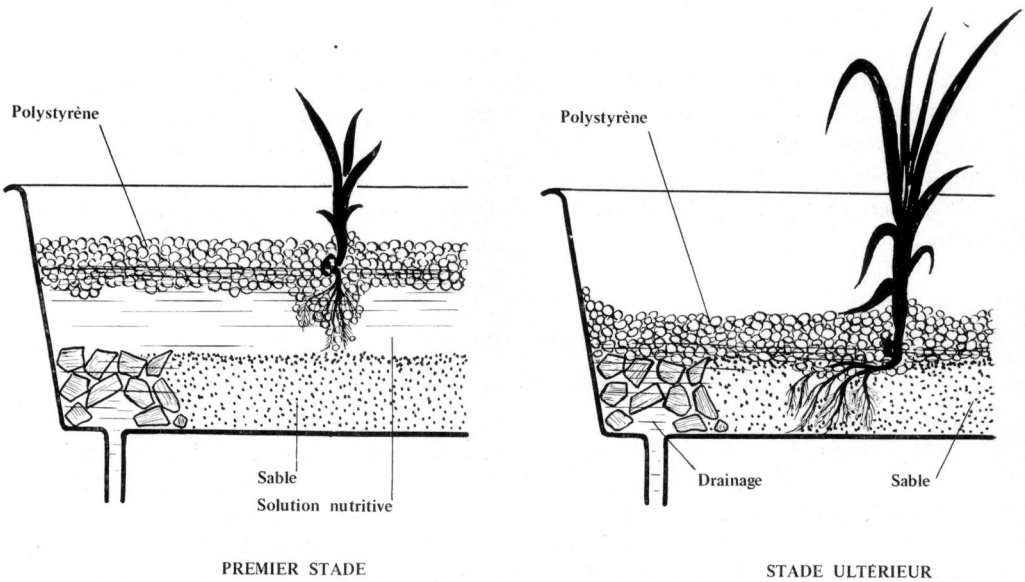



FIG. 5. — *Germination sur sol flottant avec formation d'une gangue de particules de polystyrène autour des chevelus radiculaires* (premier stade) *et évolution* (stade ultérieur) *vers une culture permanente en subirrigation sur substrat meuble avec couche superficielle de polystyrène et couche profonde de sable.*

plus haut ; elles germent, les racines traversent la couche de polystyrène, se développent dans l'eau, puis dans le sable, assurant ainsi la stabilité du végétal. Un abaissement du niveau de la solution, qui peut être dû simplement, à la non compensation de l'évapotranspiration, peut amener le substrat flottant en contact avec le sable. La végétation se poursuit alors sur un substrat meuble composé d'une couche superficielle de glomérules de polystyrène très isolante et s'opposant à la dessiccation, et d'une couche profonde de sable beaucoup plus dense dans laquelle se développent normalement les racines.

## V. — ÉQUIVALENTS NATURELS DES SOLS FLOTTANTS ARTIFICIELS

Des Chlorophycées se développent facilement sur la surface éclairée de fragments de polystyrène imprégnés de solution de culture. Ces algues ne sont pas gênantes et peuvent même, augmenter la cohésion du « sol ». Lorsque leur développement

n'a pas été contrarié artificiellement, dans le cas de cultures permanentes qui ont entraîné le dépôt de débris végétaux sur le « sol », il se forme peu à peu, un substrat flottant vivant qui ressemble curieusement à une formation que l'on peut parfois, observer dans la nature.

Dans certaines nappes d'eau peu profondes, telles que celles que nous pouvons observer au bord de l'ensemble lagunaire de Bages-Sigean, dans le Languedoc, il se développe de grandes quantités d'algues vertes : *Vaucheria* en milieu limnique, *Cladophora*, *Chaetomorpha* ou *Enteromorpha*, en milieu saumâtre. La partie supérieure de la masse des algues vient affleurer à la surface de l'eau. Les cellules, directement exposées à l'air et au soleil, meurent. Il se forme sur les grandes étendues, un substrat flottant spongieux sur lequel les vents apportent rapidement du rivage proche, des éléments minéraux et organiques ainsi que des graines de plantes terrestres plus ou moins halophiles. Il n'est pas rare que ces graines germent et commencent leur développement sur la couche d'algues flottant sur les bords du bassin lagunaire. Le même phénomène a été reproduit dans des bassins aménagés à l'intérieur d'une enceinte solaire. Des populations de *Scirpus* ont germé et se sont développées spontanément sur des nappes de *Spirogyra* flottant à la surface de l'eau.

Dans la nature, la végétation phanérogamique sur ces débuts de sols flottants, est très temporaire. Les vents violents, fréquents dans la région des étangs littoraux languedociens et l'agitation de l'eau qui en résulte, ont tôt fait de disloquer ces fragiles formations.

Dans d'autres contrées, des îlots flottants naturels plus stables et plus complexes, mais s'éloignant davantage de nos sols flottants artificiels, peuvent se constituer. Ainsi, dans les étangs des Landes, le décollement fréquent d'un enchevêtrement de racines et de rhizomes de *Typha* conduit à la formation de sortes de radeaux colonisés par des *Carex*, puis par des Joncs, des Prêles, etc. (JOVET, 1954).

Dans les eaux calmes des régions chaudes, telles que le lac Tchad, les Roseaux et les Papyrus contribuent à la création d'îles flottantes de grande étendue. Signalons enfin, que l'homme intervient parfois pour favoriser l'œuvre de la nature. C'est ainsi, que sur les lacs de la région de Mexico, les Aztèques construisaient des radeaux de roseaux amarés à des pieux sur lesquels des débris s'accumulaient jusqu'à ce que ce support flottant permette la pratique de cultures vivrières.

*Reçu pour publication en avril 1972.*

## SUMMARY

### ARTIFICIAL FLOATING SOILS FOR EXPERIMENTAL CULTIVATION

The author, carrying out experiment on solar still greenhouses has been lead to adjust a process of cultivation on an artificial substratum made of polystyren particles floating on the surface of a nutritive solution. Aeration and circulation of this solution are produced by mere static pumps functioning with air pulsated at low pressure or with vacuum.

Polystyren particles aggregate within radicular system. They form a kind of sponge which retains plenty of nutritive solution, permitting a very easy pricking of sapling. There is the main result of this experimental cultivation process.

It can be also used for long duration cultivation in waterproof tanks. In some cases, this artificial floating substract is able to evolve in a biological soil.

## ZUSAMMENFASSUNG

### KÜNSTLICHE SCHWIMMENDE BÖDEN FÜR EXPERIMENTALE KULTUREN

Eine Keimungs - und Anbauvorrichtung wurde, aus Anlass von Untersuchungen über biologische Sonnenabschirmungen, auf einem künstlichen Substrat entwickelt, das aus über einer Nährexpandiertelösung schwimmenden Polystyrenteilchen bestand. Der Umlauf und die Belüftung werden durch einfache statische, mit Pressluft oder Vakuum betriebene Pumpen durchgeführt.

Das Hauptergebnis dieses Anbausystems besteht in der Tatsache, dass auf dem Wurzelsystem eine aus Polystyrenteilchen bestehende Schicht erscheint, die das Pikieren der Setzlinge äusserst erleichtert. Das Verfahren ist auch für Kulturen von längerer Dauer bei Berwendung von dichten Kammern benutzbar. In bestimmten Fällen kann sich dieses künstliche schwimmende Substrat zu einem biologischen, schwimmenden Böden entwickeln.

## РЕЗЮМЕ

Искуственные пловучие почвы для экспериментальных культур.

Г. БУТИЕР.

При проведении опытов над Биологическими Солнечными Заграждениями было разработано приспособление для проростания и культур на искуственном субстрате, состоящем из частиц полистирена плавающих на питательном растворе. Движение и аэрация системы реализуются при помощи статических помп, приводящихся в движение сжатым воздухом, или вакуумом. Главным результатом полученным при применении этой системы культуры, является появление на кореншковой системе проростков оболочки из частиц полистирена, очень облегчающей процесс пересадки молодых растений. Этот прием может также служить для долгодлительных культур в герметических баках. В некоторых случаях этот искуственный пловучий субстрат может быть развит до получения пловучей биологической почвы.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BOUTIÈRE H., 1969. Utilisation de l'Énergie solaire dans l'expérimentation biologique et Enceintes biocœnotiques solaires. *Bull. Comples*, **18**, 63-66.

BOUTIÈRE H., 1972. Cultures en zones arides et Serres-Distillateurs solaires. Comm. Rencontre générale Athènes, Octobre 1971. *Bull. Comples*, **22**, 35-56.

FOEX M., TROMBE F., 1958. Dispositif pour la culture intensive dans les régions arides et ensoleillées. *Brevet français* nº 1 168 575 ; PV, 731 561.

FOEX M., 1963. Perfectionnements apportés aux dispositifs pour la culture intensive dans les régions arides et ensoleillées. *Brevet français* nº 1 353 564, PV, 921 402.

JOVET P., 1954. Landes et Pays Basque occidental. Not. Bot. Itin. Comm. *VIII^e Congrès int. Botanique*, Paris Nice 1954, Excursion 1-73, Sud-Ouest (Landes Pays Basque), 15-51.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (5), 577-580.

# CHRONIQUE DES LIVRES

OLSON (R. A.), ed. in Chief. — FERTILIZER TECHNOLOGY AND USE. — 2nd ed. — Madison (Wisconsin, U. S. A.), Soil Sci. Soc. Amer., 1971, 611 p.

La *Soil Science Society of America* édite une deuxième édition, entièrement revue et mise à jour, de l'ouvrage sur la technologie et l'utilisation des engrais, qu'elle avait publié en 1962.

Les principales mises à jour portent sur la technologie des engrais (engrais en solution et en suspension, méthodes modernes de transport, mélanges engrais-pesticides) et sur différents points tels que : qualité des récoltes en relation avec l'emploi des engrais ; prévision des besoins en éléments nutritifs grâce aux analyses de sols et analyses foliaires ; comportement des engrais dans les sols acides, alcalins et inondés ; utilisation de tous les sous-produits et résidus divers de l'activité humaine en compléments des engrais ; pollution éventuelle par les engrais.

Un index-matières complète l'ouvrage.

POTASSIUM SYMPOSIUM 1970. — ROLE OF FERTILIZATION IN THE INTENSIFICATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION. — Proceedings of the 9th Congress of the International Potash Institute, Antibes, 1970. Berne, Institut international de la Potasse, 1972, 489 p.

Ce 9e Colloque de l'Institut international de la Potasse s'est tenu à Antibes, en 1970. Dans son allocution d'ouverture, le Président du Congrès, M. l'Inspecteur général DROUINEAU a expliqué le choix du thème choisi : « le rôle de la fertilisation dans l'intensification de la production agricole » :

« A l'échelle mondiale, les besoins d'accroissement de la production agricole sont encore très élevés puisque l'on estime que d'ici 1980 elle devrait s'accroître de 65 p. 100 pour assurer à la population mondiale une alimentation suffisante. Or, il est reconnu que la fertilisation alliée à l'amélioration des variétés est le moyen d'action le plus puissant et le plus rapide, pourvu qu'il soit convenablement employé.

Nous n'ignorons pas que les responsables de l'agriculture dans les pays développés, préoccupés par les surplus agricoles, peuvent avoir quelques réserves à formuler sur un tel thème. C'est peut être une raison de plus pour l'aborder franchement sur tous les plans scientifiques, techniques, économiques et sociologiques. Les problèmes de fertilisation sont intimement liés aux conditions climatiques dont dépend l'évolution des sols, la croissance et le développement des cultures. C'est pourquoi il a été décidé d'examiner dans ce congrès le rôle de la fertilisation dans l'intensification de la production agricole dans les trois grandes zones climatiques du monde. »

Ce volume contient les exposés présentés au cours des cinq séances :

La première a débuté par des exposés généraux destinés à faire le point des recherches sur la fertilisation dans ces zones en ce qui concerne le sol, la plante et les systèmes de culture.

Des communications présentant des exemples d'intensification de différentes productions ont illustré les problèmes principaux de chaque zone climatique, en tenant compte autant que possible des conditions économiques propres à chacune d'elles.

Enfin, dans la cinquième séance, on a abordé l'importante question des facteurs, autres que ceux qui avaient été étudiés antérieurement, et qui interviennent pour limiter les rendements et l'efficacité des fumures.

PETTIJOHN (F. J.), POTTER (P. E.), SIEVER (R.). — SAND AND SANDSTONE. — Berlin, Springer-Verlag, 1972, 718 p.

Cet ouvrage de sédimentologie, consacré aux sables et aux grès, est le résultat de deux conférences qui se sont tenues sur ce sujet en 1964 et 1965 aux États-Unis. L'une était organisée par l'Association des Géologues pétroliers et l'Université d'Alberta, l'autre par la Société géologique et le Département de Géologie de l'Université d'Indiana.

L'ouvrage est construit de manière à aller du particulier au général ; il commence par des chapitres consacrés à la composition, la structure, l'organisation de la roche et se termine en considérant le problème sédimentaire à l'échelon d'un bassin.

La première partie est une mise à jour sur la composition, la structure et la texture des grès. La seconde partie est consacrée à la classification des grès et contient un glossaire. La troisième partie traite du problème de la genèse des grès : transport des sables vers le lieu de formation des grès, diagenèse chimique. La dernière partie traite des relations existant entre les faciès sableux et l'environnement ainsi que de l'évolution des grès au sein des bassins sédimentaires.

L'ouvrage est abondamment illustré et donne de bons exemples photographiques de structures sédimentologiques et pétrographiques.

POSTGATE (J. R.) ed. — THE CHEMISTRY AND BIOCHEMISTRY OF NITROGEN FIXATION. — London New York, Plenum Press, 1971, 326 p.

L'ouvrage publié sous la direction scientifique de J. R. POSTGATE et consacré à la chimie et à la biochimie de la fixation de l'azote, comporte les chapitres suivants :

WILSON (P. W.). — Introduction.
LEIGH (G. J.). — Fixation non biologique de l'azote moléculaire.
CHATT (J.). RICHARDS (R. L.). — Complexes diazotés et fixation de l'azote.
BURRIS (R. H.). — Fixation par les microorganismes libres : enzymologie.
POSTGATE (J. R.). — Fixation par les microorganismes libres : physiologie.
EVANS (H. J.). RUSSELL (S. A.). — Chimie physiologique de la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses.
SILVER (W. S.). — Chimie physiologique de la fixation symbiotique de l'azote par les plantes autres que les légumineuses.
YATES (M. G.). — Mise au point sur les travaux de recherches soviétiques concernant la biochimie de la fixation de l'azote.
POSTGATE (J. R.). — Le test de l'acétylène pour la nitrogénase.

DEVUYST (P.). — COMPRENDRE, INTERPRÉTER, APPLIQUER LA MÉTÉOROLOGIE. — Paris, Eyrolles, 1972, 164 p.

La Météorologie de P. DEVUYST est un livre d'une très belle présentation qui met à la portée de tous une agréable initiation à la météorologie.

Il présente d'une manière précise et attrayante les différents phénomènes climatiques qui régissent les multiples activités humaines (voir organigramme).

Cet ouvrage de vulgarisation peut apporter de nombreux renseignements utiles pour un enseignement de base dans cette science. Toutefois il ne présente que très peu d'informations sur l'action des phénomènes atmosphériques en agriculture, seuls la nécessité d'un service météorologique appliqué aux problèmes agronomiques et quelques cas particuliers en écologie sont évoqués.

Malgré cette restriction, c'est un livre utile aux bioclimatologistes.

P. T.

LARRAS (J.). — HYDRAULIQUE ET GRANULATS. Paris, Eyrolles, 1972, 254 p. (Collection du Centre de Recherches et d'essais de Chatou n° 15).

La présence de granulats au contact, ou dans la masse même, d'un liquide en mouvement provoque des modifications parfois considérables des caractéristiques du mouvement. Mais les dispositions respectives du liquide et des granulats et la forme de la surface libre du liquide dépendent elles-mêmes de ces caractéristiques, de sorte que l'étude de l'hydraulique en présence de granulats pose toute une série de problèmes implicites dont on connaît encore bien mal la solution.

L'ouvrage de J. LARRAS constitue l'exposé des lois scientifiques particulières qui permettent d'aborder utilement ce genre de problèmes, lorsqu'on donnait déjà les lois plus générales de l'hydraulique classique en matière de couches limites, de nombres de Reynolds ou de Froude, et d'écoulements turbulents.

L'ouvrage débute par un exposé préliminaire des propriétés générales des granulats qu'il importe de connaître pour pouvoir en lire utilement la suite : définitions, courbes granulométriques et vitesses de chute.

La première partie de l'ouvrage traite des écoulements rectilignes uniformes à surface libre sur fonds de granulats, tels qu'on les rencontre plus particulièrement en hydraulique fluviale.

La deuxième partie de l'ouvrage traite des mouvements oscillatoires sur fonds de granulats, tels qu'on les rencontre plus particulièrement en hydraulique maritime.

La troisième partie de l'ouvrage traite des écoulements rectilignes uniformes de mixtures en conduite forcée, avec ou sans dépôt solide sur le fond.

L'ouvrage traite enfin de façon assez brève, dans une quatrième et dernière partie, de la forme assez spéciale que certains problèmes d'homogénéité et de similitude peuvent prendre dans le cas des liquides au contact de granulats.

*Anal. éd.*

KIRKHAM (Don), POWERS (W. L.). — ADVANCED SOIL PHYSICS. — New York, Wiley-Interscience, 1972, 534 p.

Ce livre est un traité de mathématiques de physique du sol où sont abordés d'importants sujets tels que l'écoulement de l'eau dans les milieux poreux, les déplacements des composés en solution, les phénomènes de diffusion en phase gazeuse et les transferts de chaleur dans les sols.

Une caractéristique essentielle de cet ouvrage est représentée par la forme donnée aux développements mathématiques qui permet au lecteur d'appliquer ses connaissances scolaires à des problèmes de physique du sol. Pour chaque phénomène, la justification physique du formalisme mathématique est donnée clairement ce qui facilite beaucoup la lecture. Quand cela est possible, les auteurs exposent successivement les solutions analytiques et numériques des problèmes posés. L'intérêt de ce dernier type de solutions doit être souligné du fait de l'usage croissant des ordinateurs. La lecture de ce livre est également intéressante car il contient de nombreuses références bibliographiques, il présente des discussions détaillées des travaux les plus importants, et donne fréquemment d'utiles exemples d'applications numériques

Cet ouvrage débute par une description des forces intervenant dans les interactions entre l'eau et les constituants minéraux ou organiques des sols. Les mouvements de l'eau sont ensuite étudiés et plusieurs méthodes de résolution sont données pour les équations correspondantes. L'étude de ces mouvements se rapporte tout d'abord aux milieux saturés puis concerne le cas plus complexe des milieux non saturés. Ces derniers donnent à l'auteur l'occasion de discuter les différentes causes de variation de la conductivité hydraulique des sols. Un autre sujet très important pour l'agronome est représenté par les phénomènes de déplacement des substances solubles dans l'eau dont l'analyse peut être appliquée à l'étude des mouvements des sels minéraux ou de produits herbicides par exemple.

Ce livre est donc très intéressant et peut être très utile quel que soit le degré de connaissance du lecteur en physique du sol.

R. C.

MUNIER (R. L.). — PRINCIPES DES MÉTHODES CHROMATOGRAPHIQUES. — Paris, Azoulay, 1972, 173 p.

Le but de cet ouvrage est d'aider l'expérimentateur à acquérir une meilleure compréhension des méthodes chromatographies.

Les deux premières parties expliquent l'origine, la signification et la portée des formules les plus couramment employées aussi bien en chromatographie en phase gazeuse qu'en chromatographie en phase liquide et à toutes les formes de celles-ci. La troisième partie réunit une précieuse documentation pratique et bibliographique.

Le plan de l'ouvrage est le suivant :

— Principes généraux.

— Aspects théoriques fondamentaux de la chromatographie en relation avec la pratique, dans le cas de l'élution simple.

— Historique et documentation en chromatographie.

*Anal. éd.*

Tso (T. C.). — Physiology and biochemistry of tobacco plants. — Stroudsburg, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., 1972, 393 p.

Cet ouvrage est divivé en 32 chapitres regroupés en 6 parties principales :

— description de la plante et des types de tabac,
— croissance et développement,
— traitement après la récolte,
— métabolisme organique,
— utilisation des feuilles,
— production et régulation.

Chaque chapitre est une mise au point sur un sujet particulier et offre de nombreuses références bibliographiques puisées dans la littérature du monde entier. Les parties les plus importantes sont celles concernant la croissance et le développement (137 pages : germination, facteurs physiques, nutrition minérale, maladies physiologiques, effets de divers polluants, tumeurs, régulation de la croissance, inhibition de la croissance des bourgeons axillaires, sénescence, pesticides), et le métabolisme organique (126 pages : cycle de Krebs et bilan du carbone et de l'azote, enzymes, sucres, acides organiques, pigments acides aminés, protéines et composés apparentés, alcaloïdes, composés phénoliques, acides gras, stérols, virus de la mosaique du tabac et autres troubles induits par des maladies).

Enfin un index d'auteurs et un index par sujets complètent cet ouvrage.

J. L. G.

Glossaire de pédologie. — Description de l'environnement en vue du traitement informatique. — Paris, Informatique et Biosphère (Association), 1971, 174 p.

Le groupe d'Étude de Pédologie de l'Association « Informatique et Biosphère » a récemment terminé la mise au point d'un glossaire qui permet la description de l'environnement du profil pédologique. Cet ouvrage fait suite au glossaire paru en 1969, qui rendait possible le traitement par ordinateur, sans transposition codée, des descriptions d'horizons relevées sur le terrain (« Glossaire de pédologie. Description des horizons en vue du traitement informatique »).

Le glossaire de « description de l'environnement » est conçu dans le même esprit et en fonction du même objectif. Il représente la première publication faite à ce jour dans cette intention. En pédologie, l'environnement comprend l'ensemble des facteurs qui, d'une façon directe ou indirecte, sont responsables de la genèse, de la morphologie, et des possibilités d'utilisation du sol. Jusque-là les termes et le détail de sa description ont été laissés à l'appréciation du pédologue, alors que le plus souvent, au cours de la prospection du terrain et au moment de la confrontation des observations et des données analytiques, une connaissance précise de l'environnement est riche d'enseignements. L'usage d'un glossaire normalise son étude en suggérant une discipline intellectuelle et l'emploi d'une terminologie codifiée. Plus complètes, les descriptions de l'environnement des profils, deviendront comparables, et auront leur place dans les banques de données, puisqu'elles seront exploitables par l'informatique.

Cet ouvrage traite, en six chapitres principaux, les aspects fondamentaux de l'environnement pédologique (climatique, géomorphologique, géologique, hydrologique, végétal et humain). La diversité des matières impliquées dans leur réduction a entrainé la participation de nombreux spécialistes des disciplines intéressées, et le choix des données et des variables a été fait dans une optique pédologique, tout en tenant compte de la terminologie propre à ces disciplines.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part.* Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : × 12,5 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Correction des épreuves* : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

*Le Directeur-Gérant :* M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 2-1973.

*Dépôt légal : 1er trimestre 1973. N° d'impression : 263.*

# annales agronomiques

Bimestriel

1972

Vol. 23 . N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 587-610.

# IDENTIFICATION DES FORMES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES SOLS DE LA CHAMPAGNE CRAYEUSE

J. MULLER
avec la collaboration technique de Mlle J. VISSECHE †

*Station d'Agronomie, I. N. R. A.,*
*Route de Montmirail-Fagnières*
*51000 Châlons-sur-Marne*

## RÉSUMÉ

Après avoir présenté les principaux types de sols developpés sur craie on étudie pour chacun de ces types de sol la répartition des formes de la matière organique en fonction du couvert végétal : pineraie, savart, culture.

La répartition en humine, acides fulviques et acides humiques est précisée pour chacune des fractions libre et liée de la matière organique. On met en évidence l'importance de l'humine et la différence qui existe entre les acides humiques gris des rendzines grises et des rendzines rouges. On étudie l'influence du type pédologique et de la couverture végétale sur la répartition des formes de la matière organique dans l'horizon $A_1$ et l'on précise l'évolution de la matière organique en fonction de sa biodégradabilité.

## I. — INTRODUCTION

La Champagne crayeuse est une région naturelle définie par l'affleurement d'un substratum calcaire du Crétacé supérieur : la craie. L'étude des caractères généraux des sols développés sur craie (DUTIL et BALLIF, 1968 ; DUTIL, 1970) a permis de distinguer deux classes de sols : les sols peu évolués occupant les fonds de vallée et les sols calcimagnésiques du groupe des rendzines et du groupe des sols bruns calcaires. Les sols calcimagnésiques peuvent se développer soit sur les matériaux crayeux en place, soit sur les produits de l'érosion et du remaniement de la craie.

Il est possible de distinguer :

— les rendzines grises ou blanches, sols jeunes développés sur craie,

— les rendzines brunes et brun-rouge, développées sur paléosols cryoturbés.

Les rendzines brunes sont moins calcaires (calcaire total = 71 p. 100, calcaire actif = 24 p. 100) que les rendzines grises et ont une teneur un peu plus élevée en fer (fer libre = 0,2 p. 100, fer total = 1,0 p. 100). Les rendzines brun-rouge sont moins calcaires (calcaire total = 62 p. 100, calcaire actif = 25 p. 100) mais ont

surtout des teneurs moyennes en fer libre (0,4 p. 100) et en fer total (1,2 p. 100) qui les rapprochent des rendzines rouges.

Les rendzines rouges, développées sur craie cryoturbée sont les rendzines les moins calcaires de la région (calcaire total = 57 p. 100, calcaire actif = 18 p. 100). Ce sont elles qui contiennent le plus de fer (fer libre = 0,5 p. 100, fer total = 1,5 p. 100).

Dans la classification C. P. C. S. 1967, ces rendzines sont considérées comme des séries appartenant au sous-groupe de rendzines à très forte effervescence (très riche en calcaire actif).

Telles sont, dans l'ensemble, les conditions de sols qui sont offertes à la végétation de cette région. Compte tenu du mode d'exploitation du sol, cette végétation peut se présenter sous trois aspects bien différents :

— le « savart », steppe herbeuse parsemée de buissons qui correspondrait à la végétation naturelle de cette région, mais dont l'importance se restreint de plus en plus ;

— la pineraie, végétation semi-naturelle composée de pins sylvestres et surtout de pins noirs d'Autriche, reliquat de périodes de plantation intensives et maintenant soumise au défrichement ;

— la culture intensive de plantes céréalières, fourragères ou industrielles sur défriches de savart et surtout de pineraie.

Dans l'évolution cyclique du peuplement végétal de la Champagne, il est permis de penser que, sauf dans les vallées, le peuplement climaxique correspondait au « Savart ». Le reboisement des savarts est un phénomène récent qui s'est développé au XVIII^e siècle et surtout au XIX^e siècle. Mais dès 1945, le défrichement s'est accéléré avec l'introduction des techniques modernes de culture et les surfaces défrichées dans ces vingt dernières années avoisinent 115 000 hectares, dont 60 000 environ dans les six dernières années (Rapport de l'Atelier Régional d'Études Économiques et d'Aménagement Rural. Région Champagne-Ardenne 1970).

Devant la mise en culture intensive, quasi totale de la Champagne crayeuse, il importait donc d'entreprendre l'inventaire des formes de la matière organique des sols, afin de pouvoir apprécier le sens de son évolution.

Pour apporter des éléments de réponse à ce problème, l'objet de ce rapport est de présenter, pour chacun des trois principaux types de rendzine, la répartition des formes de la matière organique du sol en fonction du couvert végétal : pineraie, savart, culture.

Cette évolution sera appréciée à partir de la détermination quantitative de la matière organique libre et la matière organique liée. Sur chacune de ces fractions, on précisera l'importance de l'humine, des acides fulviques et des acides humiques qui seront définis lors de la présentation des méthodes analytiques.

## II. — MÉTHODES ANALYTIQUES UTILISÉES

### 1. — *Fractionnement par densité de la matière organique en fraction libre et fraction liée*

Le fractionnement est effectué, suivant la technique de MONNIER, TURC et JEANSON-LUUSINANG (1962) sur échantillon séché à l'air et broyé jusqu'à ce que la totalité de l'échantillon passe au travers d'un tamis à maille de 0,400 mm.

Un poids connu de terre fine est mis en suspension par agitation manuelle dans une liqueur de densité 2,0 (mélange alcool éthylique et bromoforme) avec un rapport sol/solution = 1/90. Après centrifugation, le surnageant constituant la fraction libre de la matière organique, et le culot, constituant la fraction liée, sont séparés quantitativement. Cette opération est effectuée par deux fois et les deux surnageants sont regroupés sur le même filtre.

Le surnageant et le culot sont pesés après séchage pour déterminer les masses de matière organique libre et les masses de matière organique liée.

### 2. — *Identification des formes de la matière organique libre et de la matière organique liée*

Sur chacune de ces fractions, l'extraction de l'humine, des acides fulviques et des acides humiques est effectuée suivant la technique de DUCHAUFOUR et JACQUIN (1966) par les trois réactifs :

1° pyrophosphate de soude 0,1 M + sulfate de soude 7,5 p. 100 à pH = 7,0
2° pyrophosphate de soude 0,1 M
3° soude 0,1 N.

Les substances organiques solubilisées par ces trois extractions consécutives sont regroupées pour le dosage des acides fulviques non précipitables par $SO_4H_2$ et pour celui des acides humiques précipitables par $SO_4H_2$.

La fraction de la matière organique liée, non solubilisée par les réactifs à base de pyrophosphate, représente conventionnellement l'humine.

L'appréciation quantitative de l'humine, des acides fulviques et des acides humiques est faite par dosage du carbone organique oxydé en milieu sulfochromique. Cette méthode, qui n'est pas à l'abri de toute critique (GRAFFIN, MONNIER et JEANDET, 1970) permet cependant une appréciation acceptable de la teneur en carbone, faute de pouvoir utiliser une méthode de combustion par voie sèche.

Les acides humiques sont à leur tour fractionnés en acides « humiques gris » ne migrant pas dans un champ électrique et en « acides humiques bruns », migrant vers l'anode. L'électrophorèse est faite suivant le protocole préconisé par DUCHAUFOUR et JACQUIN (1966) sur papier Whatman n° 1 pendant 1 heure et demie sous tension de 7,5 volts par centimètre. Les électrophorégrammes séchés sont lus sur un densitomètre manuel et la courbe d'absorption établie point par point.

## III. — CARACTÈRES PÉDOLOGIQUES DES PROFILS ÉTUDIÉS

Afin de préciser les caractéristiques des rendzines de cette région, nous donnerons la description détaillée d'un profil de sol pour chacune des trois séries de rendzines : rendzine grise, rendzine brune, et rendzine rouge.

### 1. — *Rendzine grise*

Sous couvert de pins, à Somme-Vesle (Marne), au lieu-dit « la Croix-Saulon » le profil relevé sur craie sénonienne est le suivant :

$A_{00}$ (+ 2 à 0 cm) — Litière de mousse en voie de décomposition, de couleur gris-brin foncé (10 YR 3/2).

$A_{11}$ (0 à 15 cm) — Horizon de couleur grise (10 YR 4/2) de texture limono-sableuse à structure polyédrique très nette, avec sur-structure nuciforme et cohésion assez forte. Racines nombreuses. La limite avec l'horizon sous-jacent est diffuse.

$A_{12}$ (15 à 30 cm) — Horizon de couleur beige (10 YR 5/4) de texture limono-sableuse, à structure anguleuse (50 p. 100) et grumeleuse (50 p. 100). La cohésion est élevée. Il y a d'abondants cailloux de craie. Les racines sont peu abondantes, la porosité est élevée.

C (30 cm à ...) — Roche-mère (craie : $C_7$) limite ondulée nette, avec l'horizon $A_{12}$.

Le passage à la végétation de savart se traduit par la disparition de l'horizon $A_{00}$ et par l'existence d'un seul horizon $A_1$. Sous culture, le profil s'homogénéise sur toute l'épaisseur de la couche labourée.

Les caractéristiques physico-chimiques de cette série sont données dans le tableau n° 1.

TABLEAU I

*Rendzine grise*
*Caractéristiques physico-chimiques*

| Localisation | Somme-Vesle lieu-dit : la Croix-Saulon | | | Soudron lieu-dit : Lamiraux | |
|---|---|---|---|---|---|
| Végétation | Pins | | Culture | Savart | Culture |
| Horizon | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_p$ | $A_{11}$ | $A_p$ |
| Niveau en cm | 0-15 | 15-30 | 0-20 | 0-15 | 0-20 |
| Pour cent de terre brute | | | | | |
| Cailloux | 13 | 28 | 18 | 39 | 38 |
| Graviers | 22 | 29 | 26 | 26 | 24 |
| Pour cent de terre fine | | | | | |
| Eau | 2,7 | 1,7 | 1,2 | 2,0 | 2,7 |
| Argile $\varnothing < 2\mu$ | 28,5 | 28,4 | 38,2 | 35,8 | 28,2 |
| Limon fin $2 < \varnothing < 20\mu$ | 26,3 | 25,2 | 21,8 | 34,9 | 26,4 |
| Limon grossier $20 < \varnothing < 50\mu$ | 12,2 | 8,2 | 7,8 | 2,5 | 9,3 |
| Sable fin $50 < \varnothing < 200\mu$ | 8,1 | 10,5 | 8,8 | 9,4 | 7,2 |
| Sable grossier $200 < \varnothing < 2\,000\mu$ | 20,5 | 24,1 | 19,2 | 16,0 | 24,1 |
| Matière organique | 3,8 | 3,6 | 3,7 | 5,5 | 5,5 |
| Calcaire total | 71 | 74 | 82,0 | 81,5 | 84,0 |
| pH-eau | 7,7 | 7,7 | 8,0 | 7,8 | 8,1 |
| Pour mille de terre fine | | | | | |
| Carbone | 38,6 | 18,5 | 18,6 | 30,2 | 22,4 |
| Azote | 1,70 | 1,70 | 1,90 | 3,37 | 2,66 |
| C/N | 22,8 | 10,9 | 9,9 | 9,0 | 8,4 |
| Fer total | 6,3 | 5,9 | 5,4 | 2,9 | 2,2 |
| Fer libre (DEB) | 3,1 | 3,4 | 2,0 | 2,1 | 1,1 |
| Fer total/Fer libre | 2,03 | 1,73 | 2,7 | 1,39 | 2,0 |
| Capacité d'échange méq/100 g | 44,5 | 35,0 | 34,0 | 35,0 | 33,0 |

L'analyse physique fait apparaître une texture fine équilibrée. Les sables grossiers sont particulièrement abondants. La capacité d'échange est moyenne.

Le rapport C/N très élevé dans l'horizon $A_{11}$ (23) diminue avec la profondeur (11). Il diminue également sous savart et sous culture, où il a des valeurs faibles et voisines (comprises entre 10 et 8).

### 2. — *Rendzine brune*

A Bussy-le-Château (Marne) au lieu-dit les Burtasses, le sol établi sur paléosol cryoturbé présente le profil suivant :

$A_{00}$ (+ 3 à 0 cm) — Litière de mousse en décomposition, de couleur gris-brun foncé (10 YR 3/2).

$A_{11}$ (0 à 5 cm) — Horizon de couleur gris-brun foncé (10 YR 4/4), de texture limono-sableuse, structure polyédrique subangulaire. Les racines sont très nombreuses.

$A_{12}$ (5 à 20 cm) — Horizon de couleur grise (10 YR 5/3) de texture limono-sableuse, structure sub-angulaire plus compacte que dans l'horizon supérieur. Quelques racines et quelques agrégats humifères provenant de l'horizon supérieur.

II C (20 à 50 cm) — Roche-mère, de couleur beige, de texture limono-sableuse, très compacte, avec de nombreux graviers de craie et quelques cailloux de craie entre les poches de cryoturbation.

La végétation est constituée de pins, genévriers et d'une pelouse abondante de mousse associée à quelques graminées.

Sous savart, le profil est caractérisé par l'existence uniquement de deux horizons : un horizon $A_0$ entre 0 à 7 cm et un horizon $A_1$ entre 7 et 15 cm où les racines sont très abondantes. La végétation est exclusivement constituée par une pelouse à graminées. Sous culture, le profil est homogénéisé sur les 20 premiers centimètres de la couche arable. Le niveau de séparation avec la roche-mère est marqué par la présence d'une semelle de labour.

Les caractéristiques physico-chimiques des sols de cette série sont données dans le tableau 2. Elles sont voisines de celles notées pour les rendzines grises.

TABLEAU 2

*Rendzine brune*
*Caractéristiques physico-chimiques*

| Localisation | Bussy-le-Château Lieu-dit : Les Burtasses | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Végétation | Pins | | | Savart | | Culture |
| Horizon | $A_{00}$ | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_0$ | $A_1$ | $A_p$ |
| Niveau en cm | + 3-0 | 0-5 | — 5-20 | 0-7 | — 7-15 | 0-20 |
| Pour cent de terre fine | | | | | | |
| Eau | | 3,5 | 2,1 | 4,1 | 2,1 | 1,8 |
| Argile $\varnothing < 2\,\mu$ | | 24,2 | 25,2 | 24,2 | 25,2 | 24,5 |
| Limon fin $2 < \varnothing < 20\,\mu$ | | 31,2 | 29,8 | 31,7 | 29,6 | 37,0 |
| Limon grossier $20 < \varnothing < 50\,\mu$ | | 9,7 | 9,0 | 11,8 | 9,2 | 12,1 |
| Sable fin $50 < \varnothing < 200\,\mu$ | non analysé | 5,7 | 5,1 | 5,4 | 5,4 | 5,4 |
| Sable grossier $200 < \varnothing < 2000\,\mu$ | | 18,4 | 24,5 | 14,4 | 22,2 | 17,5 |
| Matière organique | | 8,6 | 4,6 | 10,3 | 5,4 | 3,1 |
| Calcaire total | 14,2 | 63,4 | 49,6 | 43,1 | 67,4 | 68,6 |
| pH-eau | 6,8 | 8,1 | 8,0 | 7,9 | 8,1 | 8,2 |
| Pour mille de terre fine | | | | | | |
| Carbone | 28,7 | 48,3 | 22,0 | 55,0 | 27,3 | 16,8 |
| Azote | 9,7 | 3,20 | 1,90 | 3,0 | 1,99 | 1,87 |
| C/N | 29,2 | 15,1 | 11,6 | 18,3 | 13,7 | 11 |
| Fer total | 4,1 | 5,9 | 5,4 | 6,8 | 6,9 | 7,2 |
| Fer libre (DEB) | 2,0 | 3,1 | 2,9 | 2,8 | 3,2 | 4,9 |
| Fer total/Fer libre | 2,1 | 1,9 | 1,9 | 2,4 | 2,2 | 1,5 |
| Capacité d'échange méq./100 g | 90 | 37 | 33 | 38 | 32 | 32 |

### 3. — *Rendzine rouge*

Sous couvert de pins associés à quelques genévriers et graminées et sous un tapis de mousse abondante, le profil relevé à Courtisols au lieu-dit le Mont-Mounier est le suivant :

$A_{00}$ (+ 5 à 0 cm) — Litière de mousse en décomposition, avec un abondant mycélium de champignons. Couleur gris-brun foncé (10 YR 2/2).

$A_{11}$ (0 à 5 cm) — Horizon de couleur brun-noir (7,5 YR 2/2) à texture limono-argileuse. Structure granuleuse à débit angulaire (75 p. 100) et grumeleux (25 p. 100). Il existe un feutrage abondant de racines de pins et de graminées.

$A_{12}$ (5 à 10 cm) — Horizon de transition de couleur brun rouge foncé (5 YR 4/5) à texture limono-argileuse, structure sub-angulaire, provenant en partie de l'horizon $A_{11}$ et de structure anguleuse provenant de l'horizon $A_{13}$. Les racines sont très nombreuses. Quelques gravillons.

TABLEAU 3

*Rendzine rouge*
*Caractéristiques physico-chimiques*

| Localisation | Courtisols — Lieu-dit : Mont-Mounier | | | | | | | | | St-Jean/ Moivre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Végétation | Pins | | | | Savart | | | | Culture | Culture |
| Horizon | $A_0$ | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_{13}$ | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_{13}$ | $C_1/C_2$ | $A_p$ | $A_p$ |
| Niveau en cm | + 5-0 | 0-5 | — 5-10 | — 10-25 | 0-5 | — 5-10 | — 10-20 | — 20-40 | 0-25 | 0-25 |
| Pour cent de terre fine | | | | | | | | | | |
| Eau | non analysé | 5,5 | 3,8 | 2,9 | 5,6 | 3,8 | 2,5 | 0,7 | 2,1 | 2,5 |
| Argile $\varnothing < 2\,\mu$ | | 21,0 | 20,1 | 20,6 | 20,6 | 20,2 | 20,2 | 20,5 | 21,7 | 23,6 |
| Limon fin $2 < \varnothing < 20\,\mu$ | | 29,1 | 28,0 | 30,4 | 28,4 | 26,8 | 28,1 | 25,0 | 27,6 | 30,0 |
| Limon grossier $20 < \varnothing < 50\,\mu$ | | 21,9 | 18,4 | 19,1 | 16,7 | 14,3 | 15,5 | 8,4 | 13,3 | 19,9 |
| Sable fin $50 < \varnothing < 200\,\mu$ | | 5,4 | 4,3 | 5,1 | 5,2 | 5,5 | 5,8 | 11,3 | 5,6 | 7,3 |
| Sable grossier $200 < \varnothing < 2000\,\mu$ | | 6,1 | 20,2 | 20,9 | 10,4 | 19,9 | 22,5 | 29,6 | 25,7 | 14,4 |
| Matière organique | | 11,6 | 6,5 | 2,7 | 13,8 | 7,4 | 3,4 | 0,89 | 3,3 | 3,6 |
| Calcaire total | 12,0 | 24,0 | 33,0 | 38,0 | 32,6 | 42,6 | 50,6 | 81,7 | 57,1 | 43,3 |
| pH-eau | 7,2 | 7,9 | 7,6 | 8,4 | 7,5 | 7,8 | 8,1 | 8,3 | 8,3 | 8,0 |
| Pour mille de terre fine | | | | | | | | | | |
| Carbone | 15,6 | 60,9 | 36,8 | 13,4 | 72,5 | 39,1 | 13,1 | 7,4 | 16,0 | 22,1 |
| Azote | 6,30 | 3,60 | 2,45 | 1,40 | 4,30 | 2,73 | 1,51 | 0,36 | 1,54 | 2,37 |
| C/N | 25 | 17 | 15 | 9,6 | 17 | 14 | 8,7 | — | 11 | 9,4 |
| Fer total | 13,7 | 17,8 | 15,1 | 17,0 | 14,1 | 14,2 | 14,0 | 4,4 | 11 | 15,6 |
| Fer libre (DEB) | 6,9 | 8,4 | 8,1 | 8,3 | 7,2 | 7,3 | 7,2 | 2,1 | 5,5 | 7,4 |
| Fer total/Fer libre | 2,0 | 2,1 | 1,9 | 2,1 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,0 | 2,1 |
| Capacité d'échange méq./100 g | 67 | 48 | 40 | 35 | 48 | 38 | 33 | — | 27 | 31 |

$A_{13}$ (10 à 25 cm) — Horizon de couleur brun-orange (5 YR 5/6) à texture limono-argileuse, structure anguleuse à fine. Quelques racines de pins et de nombreuses radicelles de graminées. Nombreux gravillons.

$C_1/C_2$ (25 cm à ...) — La roche-mère est une craie à poches, de couleur jaune, paléosol cryoturbé : (10 YR 7,5/2,5). Texture limono-sableuse entre les cheminées de cailloux crayeux. Les racines sont très rares dans la roche-mère. Comme dans les profils précédents, le passage du couvert de pins, au savart, se traduit par la disparition de l'horizon $A_{00}$. Un seul horizon $A_1$ peut être différencié. Sous culture le profil est homogène sur les 20 à 25 premiers centimètres.

Les caractéristiques physico-chimiques de cette série sont données dans le tableau 3.

## IV. — RÉSULTATS

### 1. — *Répartition de la matière organique dans la fraction libre et dans la fraction liée*

La répartition de la matière organique en fonction de la série pédologique, lorsque le profil se présente avec le maximum d'horizons différenciés, c'est-à-dire sous pineraie (fig. 1), montre que la teneur en matière organique libre va en décroissant de la rendzine grise à la rendzine rouge. Dans le cas des rendzines grises et brunes, le profil est peu différencié. Il n'y a qu'un seul horizon $A_1$ en dehors de l'horizon d'accumulation organique $A_{00}$. Pour la rendzine rouge, la transition est plus progressive et nous pouvons subdiviser l'horizon $A_1$ en deux ou trois sous-horizons $A_{11}$, $A_{12}$ et $A_{13}$.

En fonction de la couverture végétale (fig. 1), le profil sous savart se rapproche du profil sous couvert de pins. La différence essentielle est la disparition de l'horizon $A_{00}$. Le rapport C/N est compris entre 18 et 13, sauf pour la rendzine grise, où les valeurs du rapport C/N sont beaucoup plus faibles et voisines de 10. Sous culture, il y a une très forte réduction de la matière organique libre et le rapport C/N oscille entre 8 et 10.

Par la différenciation plus poussée des horizons des rendzines rouges et la teneur plus faible en matière organique libre, même dans l'horizon $A_{00}$, il semble que les rendzines rouges correspondent à une série plus évoluée que celle des rendzines grises et brunes.

### 2. — *Importance relative de l'humine, des acides fulviques et des acides humiques*

L'importance de ces divers constituants est appréciée à partir de la teneur en carbone organique. Les résultats sont ensuite exprimés en pourcentage de sol séché à l'air afin de pouvoir juger de leur importance relative.

L'extraction par le réactif pyrophosphate-soude solubilise les acides humiques et les acides fulviques. Le résidu représente l'humine pour la matière organique liée. Pour la matière organique libre, ce résidu représente les fragments végétaux non encore décomposés.

Les résultats de ces diverses extractions dans le cas des rendzines grises, brunes et rouges sont donnés dans les tableaux 4, 5 et 6. La figure 2 schématise l'ensemble de ces observations.

*La fraction insoluble de la matière organique* libre constitue la presque totalité de la matière organique de l'horizon $A_{00}$ des rendzines grises et brunes. Dans le cas

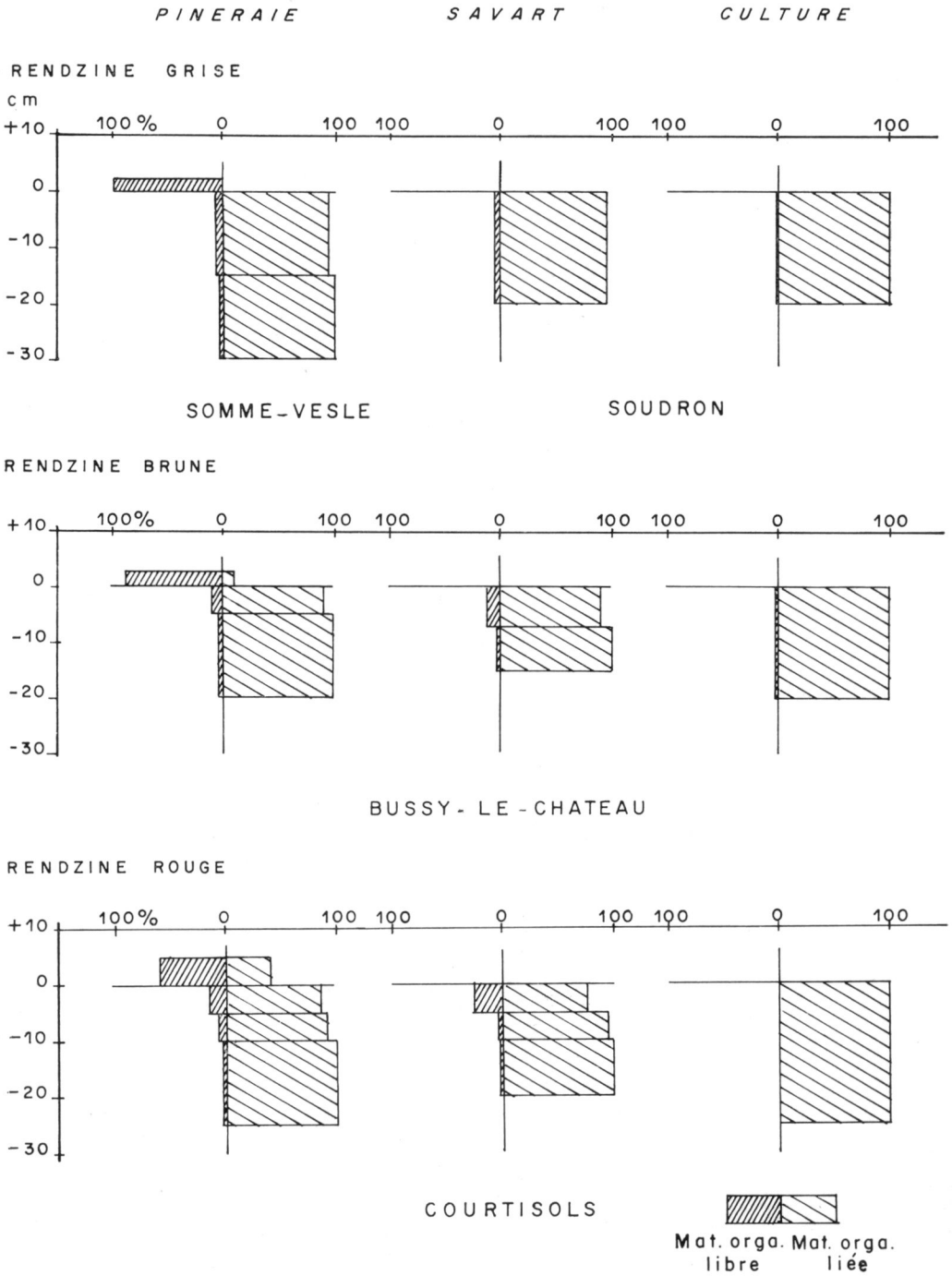



FIG. 1. — *Diagramme de répartition des fractions organo-minérales libres et liées*

TABLEAU 4

*Acides fulviques et acides humiques dans les fractions libres et liées de la matière organique*
*Rendzine grise*
Résultats exprimés en carbone organique p. 100 de sol séché à l'air

| Localisation | Végétation | Horizon | Niveau en cm | Matière organique libre | | | Matière organique liée | | | Taux d'humification de la matière organique liée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Insoluble pyrophosphate | Acides fulviques | Acides humiques | Humine | Acides fulviques | Acides humiques | |
| Somme-Vesle | Pins | $A_{11}$ | — 0-15 | 0,86 | 0,03 | 0,06 | 2,25 | 0,15 | 0,24 | 0,69 |
| | | $A_{12}$ | — 15-30 | 0,29 | < 0,01 | 0,02 | 0,94 | 0,07 | 0,07 | 0,62 |
| | Culture | | 0-20 | 0,18 | < 0,01 | < 0,01 | 1,08 | 0,07 | 0,09 | 0,71 |
| Soudron | Savart | $A_{11}$ | 0-20 | 0,40 | < 0,02 | 0,01 | 1,69 | 0,20 | 0,14 | 0,70 |
| | Culture | $A_p$ | 0-20 | 0,14 | < 0,01 | < 0,01 | 1,48 | 0,08 | 0,13 | 0,78 |

TABLEAU 5

*Acides fulviques et acides humiques dans les fractions libres et liées de la matière organique*
*Rendzine brune*

Résultats exprimés en carbone organique p. 100 de sol séché à l'air

| Localisation | Végétation | Horizon | Niveau en cm | Matière organique libre | | | Matière organique liée | | | Taux d'humification de la matière organique liée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Insoluble pyrophosphate | Acides fulviques | Acides humiques | Humine | Acides fulviques | Acides humiques | |
| Bussy-le-Château | Pins | $A_{00}$ | + 3-0 | 25,2 | 0,68 | 0,39 | | non extrait | | |
| | | $A_{11}$ | 0-5 | 1,52 | 0,08 | 0,07 | 1,96 | 0,29 | 0,20 | 0,48 |
| | Savart | $A_{12}$ | — 5-20 | 0,48 | 0,02 | 0,01 | 1,01 | 0,17 | 0,10 | 0,65 |
| | | $A_0$ | 0-7 | 2,18 | 0,11 | 0,05 | 2,46 | 0,36 | 0,17 | 0,52 |
| | Culture | $A_1$ | — 7-15 | 0,56 | 0,03 | 0,02 | 1,44 | 0,21 | 0,06 | 0,60 |
| | | $A_p$ | 0-20 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 1,18 | 0,19 | 0,05 | 0,80 |

TABLEAU 6

*Acides fulviques et acides humiques dans les fractions libres et liées de la matière organique*
*Rendzine rouge*

Résultats exprimés en carbone organique p. 100 de sol séché à l'air

| Localisation | Végétation | Horizon | Niveau en cm | Matière organique libre | | | Matière organique liée | | | Taux d'humification de la matière organique liée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Insoluble pyrophosphate | Acides fulviques | Acides humiques | Humine | Acides fulviques | Acides humiques | |
| Courtisols | Pins | $A_0$ | + 5-0 | 14,0 | 0,34 | 0,25 | 1,18 | 0,14 | 0,15 | 0,09 |
| | | $A_{11}$ | 0-5 | 2,84 | 0,07 | 0,07 | 2,63 | 0,20 | 0,20 | 0,48 |
| | | $A_{12}$ | — 5-10 | 1,15 | 0,06 | 0,05 | 1,76 | 0,23 | 0,15 | 0,57 |
| | | $A_{13}$ | — 10-25 | 0,23 | 0,01 | 0,04 | 0,65 | 0,09 | 0,05 | 0,55 |
| | Savart | $A_{11}$ | — 0-5 | 3,14 | 0,22 | 0,16 | 1,92 | 0,21 | 0,26 | 0,34 |
| | | $A_{12}$ | — 5-10 | 1,00 | 0,02 | 0,03 | 2,42 | 0,20 | 0,22 | 0,72 |
| | | $A_{13}$ | — 10-20 | 0,29 | 0,02 | 0,03 | 0,61 | 0,08 | 0,23 | 0,72 |
| | Culture | $A_p$ | 0-25 | 0,29 | 0,006 | 0,004 | 1,06 | 0,11 | 0,06 | 0,74 |
| St-Jean/Moivre | Culture | $A_p$ | 0-25 | 0,35 | 0,014 | 0,014 | 1,09 | 0,22 | 0,12 | 0,63 |

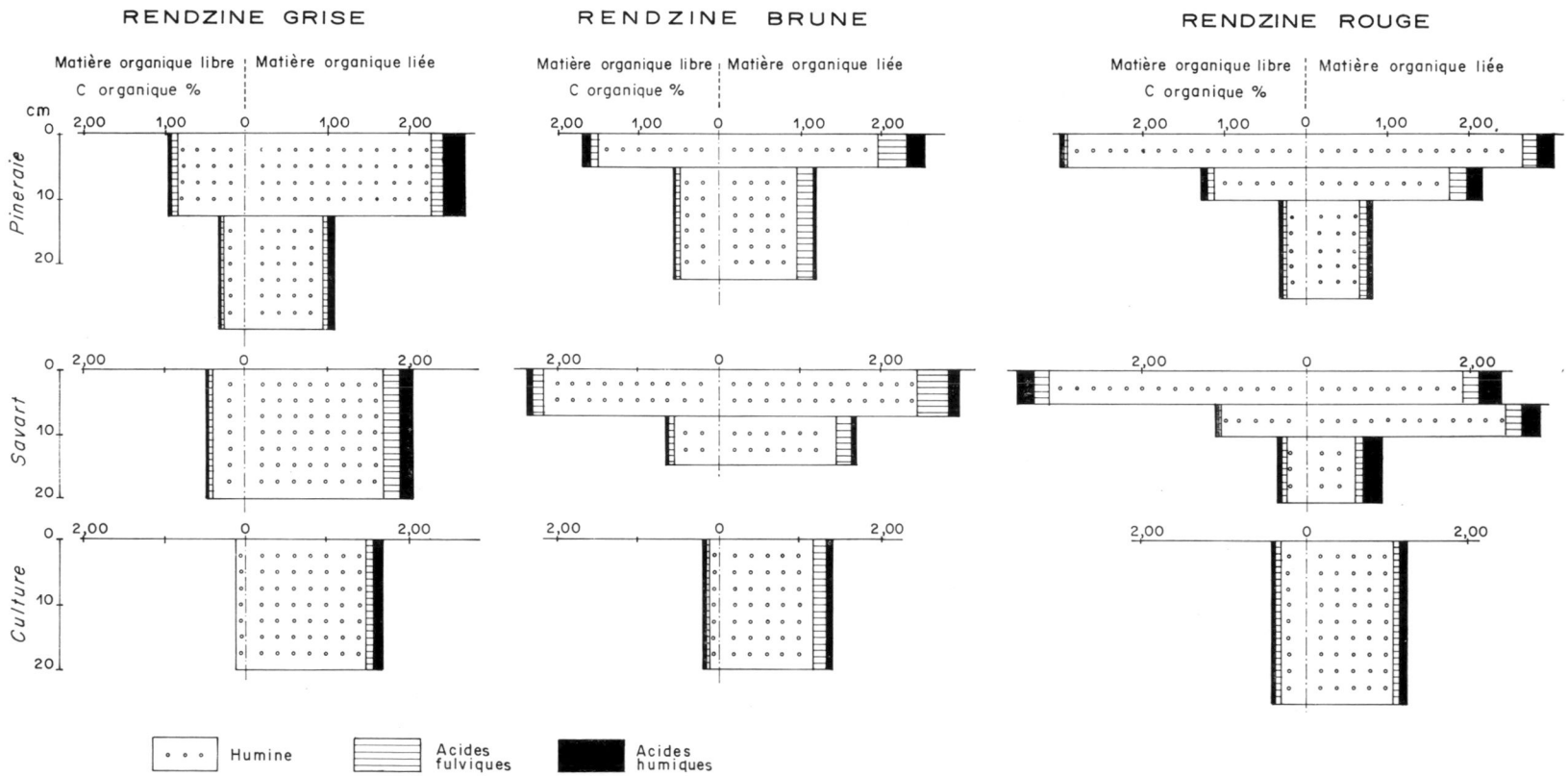



FIG. 2. — *Répartition des composés humiques dans la fraction libre et dans la fraction liée de la matière organique*

des rendzines rouges, son importance diminue légèrement par suite de la présence de matière organique liée en quantité appréciable.

*L'humine* proprement dite est la fraction la plus importante de la matière organique liée. Exprimée en carbone, elle représente environ 50 p. 100 du carbone organique total. La teneur en carbone diminue lors de la mise en culture du sol et l'on constate une accumulation relative de l'humine lorsque l'on passe de la végétation de pins à la végétation de « savart » et de la végétation de « savart » à la culture, cela indépendamment de la série pédologique. En effet, pour l'ensemble des profils que nous avons examinés, sous couvert de « savart », elle représente 44 à 66 p. 100 et sous culture, 50 à 78 p. 100.

Les acides fulviques et humiques de la matière organique libre sont toujours présents en faible quantité. Leur importance semble encore diminuer avec la mise en culture. Mais leur signification est douteuse, car la majeure partie d'entre eux peut s'être néoformée lors de l'extraction par les réactifs à base de pyrophosphate.

*Les acides fulviques et humiques de la matière organique liée* sont en quantité plus importante que dans la matière organique libre. Cependant ils ne représentent encore qu'une faible proportion du carbone organique total. Leur teneur a tendance à diminuer avec la mise en culture et il ne semble pas exister quantitativement de relation avec la série pédologique.

Ces résultats montrent donc qu'il n'y a pas de différence appréciable dans la répartition de l'humine, des acides fulviques et des acides humiques en fonction de la série pédologique. Par contre, le couvert végétal a une influence qui se trouve confirmée quand on calcule le taux d'humification.

*Le taux d'humification de la matière organique* est défini par le rapport entre le carbone de l'humine, des acides humiques et fulviques de la matière organique liée, et le carbone organique total. Les valeurs du taux d'humification calculées à partir des données des tableaux 4, 5 et 6 montrent nettement l'effet prédominant du couvert végétal sur la série pédologique.

Pour les différentes rendzines sous couvert de pins, le taux d'humification ne varie pas de façon significative et sa valeur moyenne est voisine de 0,55. Par contre, il augmente progressivement en passant au couvert de savart (valeur moyenne voisine de 0,75).

La diminution de la teneur en acides fulviques et humiques et l'augmentation de la teneur en humine lorsque l'on passe d'un stade de végétation naturelle ou semi-naturelle (pins ou savart) à un stade de culture donne à penser que chacune des fractions organiques regroupées sous la désignation d'humine, d'acides fulviques et d'acides humiques est constituée, en partie, de composés très stables, et en partie, de composés peu stables, dégradables lorsque changent les conditions d'exploitation du sol. Cependant le pourcentage de composés stables est plus grand dans la fraction humine que dans les autres fractions.

### 3. — *Fractionnement des acides humiques en acides « humiques gris » et acides « humiques bruns »*

Ces deux groupes d'acides humiques sont distingués par leur mobilité électrophorétique. Les acides humiques gris sont immobiles dans un champ électrophorétique, et restent à l'emplacement de la dépose. Les acides humiques bruns mobiles

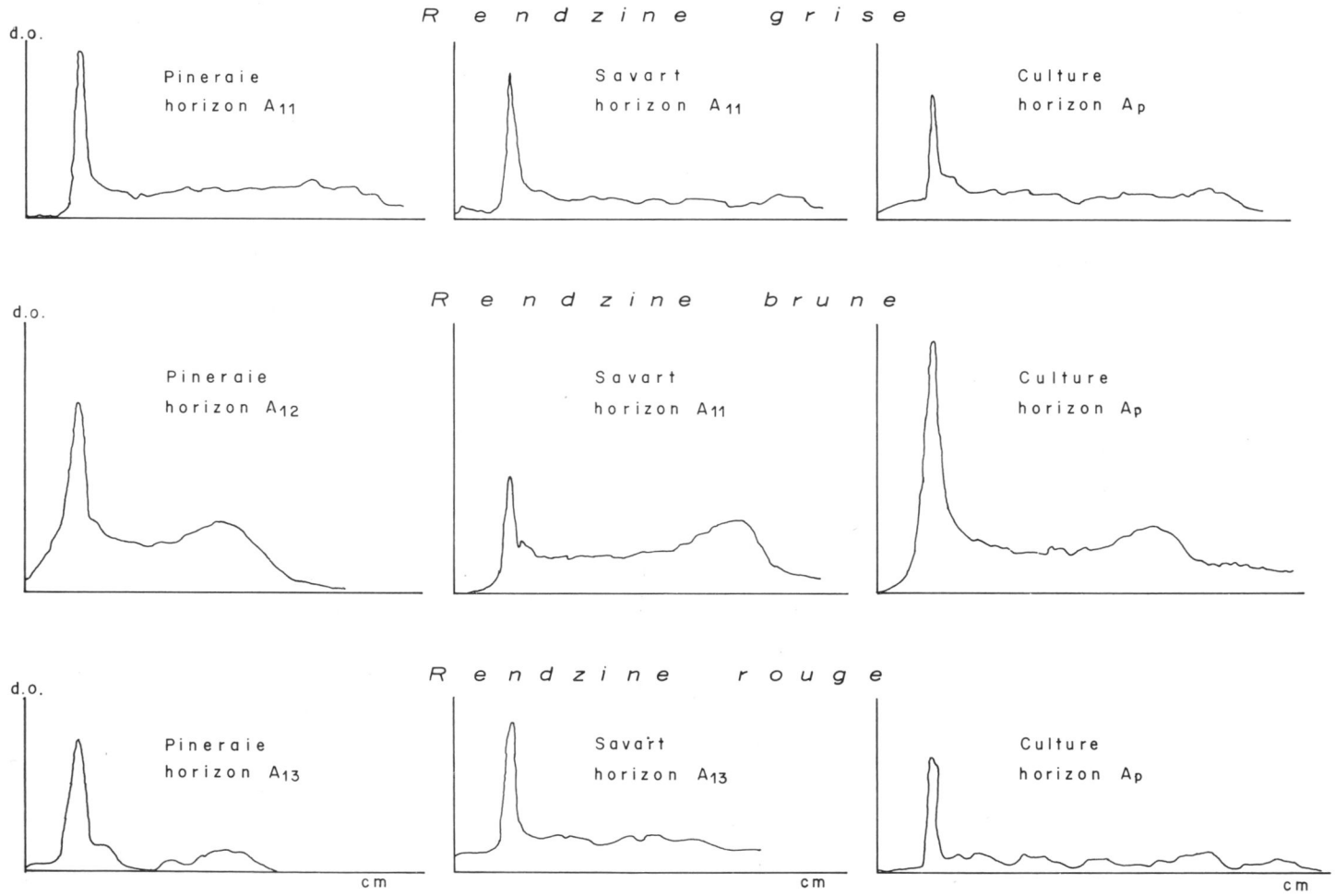



FIG. 3. — *Électrophorégramme des acides humiques*

TABLEAU 7

*Acides humiques gris et acides humiques bruns dans les fractions libres et liées de la matière organique*

Résultats exprimés en p. 100 des acides humiques totaux

| Localisation | Végétation | Niveau en cm | Matière organique libre | | | Matière organique liée | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A. H. gris | A. H. bruns | A. H. bruns / A. H. gris | A. H. gris | A. H. bruns | A. H. bruns / A. H. gris |
| | | | *Rendzine grise* | | | | | |
| Somme-Vesle | Pins | 0-15 | 15,8 | 39,0 | 2,4 | 38,4 | 42,9 | 1,12 |
| — | — | — 15-30 | 27,8 | 44,1 | 1,6 | 39,7 | ≈ 0 | ≈ 0 |
| Soudron | Savart | 0-20 | 23,0 | 40,3 | 1,8 | 23,8 | 26,4 | 1,1 |
| Somme-Vesle | Culture | 0-20 | 30,5 | 28,1 | 0,9 | 44,2 | 27,9 | 0,63 |
| Soudron | — | 0-20 | 30,0 | 33,5 | 1,1 | 32,6 | 32,0 | 0,98 |
| | | | *Rendzine brune* | | | | | |
| Bussy-le-Chateau | Pins | + 3-0 | 6,7 | 74,3 | 11,1 | | non déterminé | |
| — | — | 0-5 | 19,2 | 78,3 | 4,1 | 15,4 | 50,8 | 3,3 |
| — | — | — 5-20 | 26,1 | 39,1 | 1,5 | 12,8 | 46,9 | 3,7 |
| — | Savart | 0-7 | 10,4 | 58,3 | 5,6 | 26,4 | 47,1 | 1,8 |
| — | — | — 7-15 | 11,1 | 62,2 | 5,6 | 13,5 | 47,4 | 3,5 |
| — | Culture | 0-20 | 26,8 | 36,8 | 1,4 | 35,0 | 36,2 | 1,0 |
| | | | *Rendzine rouge* | | | | | |
| Courtisols | Pins | + 5-0 | 14,0 | 74,5 | 5,3 | 29,5 | 25,5 | 0,9 |
| — | — | 0-5 | 9,7 | 62,2 | 6,4 | 14,1 | 48,1 | 3,4 |
| — | — | — 5-10 | 9,7 | 56,0 | 5,7 | 24,3 | 59,0 | 2,4 |
| — | — | — 10-25 | 14,7 | 45,9 | 3,1 | 41,0 | ≈ 0 | ≈ 0 |
| — | Savart | 0-5 | 5,8 | 54,5 | 9,3 | 28,2 | 44,7 | 1,6 |
| — | — | — 5-10 | 12,2 | 37,7 | 3,1 | 12,0 | 43,2 | 3,6 |
| — | — | — 10-20 | 20,7 | 43,1 | 2,1 | 34,9 | ≈ 0 | ≈ 0 |
| — | Culture | 0-25 | 12,2 | 37,7 | 3,1 | 24,6 | 24,2 | 1,0 |
| St-Jean/Moivre | — | 0-25 | 42,4 | 24,2 | 0,6 | 40,0 | 20,0 | 0,5 |

migrent vers l'anode. Il est également possible de distinguer les acides humiques intermédiaires qui diffusent de manière régulière sur toute la surface de migration et qui, en lumière ultra-violette, présentent une fluorescence jaunâtre pour une longueur d'onde de 366 nm.

Après obtention de l'électrophorégramme (fig. 3), l'importance relative de ces deux formes d'acides humiques est appréciée à partir de l'intégration des densitogrammes obtenus après électrophorèse. L'ensemble des résultats pour les trois séries de rendzines est donné dans le tableau 7.

Si l'on examine la répartition des acides humiques gris et des acides humiques bruns en fonction de la fraction de la matière organique, on constate :

— pour la matière organique libre, la prédominance des acides humiques bruns par rapport aux acides humiques gris. Cette différence est surtout marquée lorsque le sol est occupé par sa végétation naturelle,

— pour la matière organique liée, la répartition est inverse de la précédente : les acides humiques gris prédominent et même dans les horizons $A_{12}$ des rendzines grises et dans l'horizon $A_{13}$ des rendzines rouges, les acides humiques bruns peuvent disparaître presque totalement.

L'étude de la répartition des acides humiques gris qui représentent des composés organiques très stables et des acides humiques bruns, beaucoup moins stables, nous permet de préciser la relation avec la couverture végétale.

*Influence de la couverture végétale.* L'importance des acides humiques bruns par rapport aux acides humiques gris varie avec la nature du couvert végétal.

Sous végétation de pins et de savart, les acides humiques bruns des rendzines brunes et rouges sont plus importants que les acides humiques gris. Pour les rendzines grises, ils sont sensiblement à égalité.

## V. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ces résultats ont montré, d'une part le rôle de la couverture végétale sur la répartition de la matière organique en fraction libre et en fraction liée, d'autre part l'importance de l'humine dans la fraction liée.

### 1. — *Répartition des matières organiques dans la fraction libre et dans la fraction liée*

Sous végétation naturelle (savart) ou semi-naturelle (pineraie), le brassage des horizons limité à la seule action des animaux fouisseurs entraîne une accumulation importante de la matière organique libre dans les horizons de surface, ainsi que la constitution d'une litière très importante pouvant atteindre 5 à 10 centimètres d'épaisseur sous couvert de pins. Il y a ralentissement de la biodégradation des matières végétales. Le taux de matière organique libre atteint 5 à 10 p. 100 dans l'horizon $A_0$. Le ralentissement de la biodégradation des matières organiques dans cet horizon ne semble pas dû exclusivement à la présence en très grande quantité de calcaire. Il se crée un véritable mulch de résidus végétaux. Le pédoclimat particulier de ce mulch s'oppose probablement à un mûrissement de l'humus vers des

formes fortement stabilisées. La mise en culture du sol réalise un brassage des horizons dans les vingt premiers centimètres et supprime ces conditions particulières. C'est un des facteurs susceptibles de provoquer la réactivation de la biodégradation avec une disparition très rapide de la matière organique libre dont la teneur tombe aux environs de 1 p. 100 au maximum.

### 2. — *Importance de l'humine*

Dans la matière organique liée, l'humine représente la fraction la plus importante lors de la mise en culture puisque, dans les profils que nous avons étudiés, il varie entre 50 et 78 p. 100. Malheureusement, cette masse de matière organique évoluée, mal connue, est difficile à caractériser.

### 3. — *Différence entre les acides humiques gris des rendzines grises et des rendzines rouges*

Ces acides humiques évolués, résistants à la biodégradation microbienne sont intéressants à considérer car il apparaît pour eux une différenciation qualitative suivant la série de rendzine.

En effet, les acides humiques gris des rendzines grises et brunes se distinguent des acides humiques gris des rendzines rouges par leurs spectres d'absorption indépendant de la nature du couvert végétal.

Pour préciser cette différence, nous avons tracé les courbes d'absorption dans l'ultraviolet et dans le visible ($220 \text{ nm} < \lambda < 600 \text{ nm}$) des acides humiques extraits d'une rendzine grise et d'une rendzine rouge dans des conditions identiques d'occupation du sol, c'est-à-dire sous culture.

Les électrophorégrammes nous ont montré que, dans ces conditions, les acides humiques gris prédominaient par rapport aux acides humiques bruns et intermédiaires.

Les courbes d'absorption ont été établies pour des concentrations identiques en carbone et les résultats sont présentés sur la figure 4 où la valeur du coefficient d'extinction est calculée en gramme de carbone par litre de solution.

Les deuxième et troisième réactifs d'extraction de DUCHAUFOUR et JACQUIN extraient la majeure partie des acides humiques gris. L'augmentation de la valeur du coefficient d'extinction de la troisième extraction à 260 nm pour la rendzine rouge traduirait, d'après BULTER et LADD (1969), une augmentation de la teneur en radicaux carboxyliques et une condensation moins importante des acides humiques gris des rendzines grises ainsi que le montrent les valeurs suivantes :

Valeurs du rapport des coefficients d'extinction 550 et 250 nm :

| Extraction | Pyrophosphate de soude 0,1 M | Soude 0.1 M |
|---|---|---|
| Rendzine grise | 0,070 | 0,060 |
| Rendzine rouge | 0,082 | 0,066 |

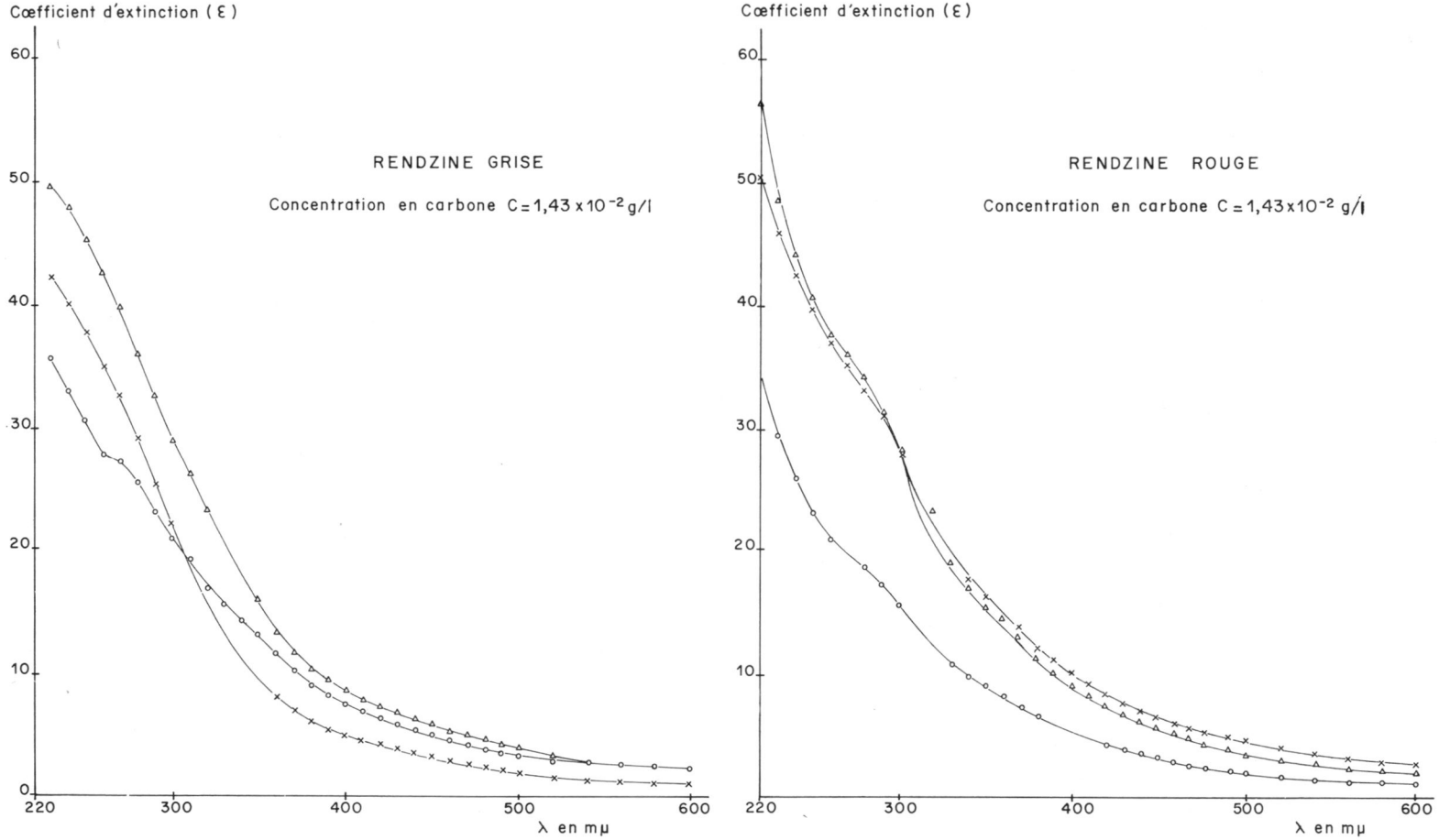



FIG. 4. — *Absorption des rayonnements visibles et UV par les acides humiques de l'horizon $A_p$ de rendzine grise et de rendzine rouge*

o—o extraction pyrophosphate + sulfate de sodium pH = 7,0
Δ—Δ extraction soude 0,1 N
×—× extraction pyrophosphate de sodium 0,1 M

### 4. — *Influence du type pédologique et de la couverture végétale sur la répartition des formes de la matière organique dans l'horizon $A_1$*

Pour ces rendzines, l'horizon $A_1$, dont l'épaisseur moyenne est comprise entre 15 et 20 cm, est le plus intéressant à considérer. En effet, c'est à ce niveau que se produit l'essentiel des processus de pédogenèse. C'est également lui qui sera remanié par les façons culturales lors de la mise en exploitation du sol. En fonction de ce critère, l'examen des résultats obtenus jusqu'à présent offre une vue plus synthétique de l'évolution du sol.

Dans cette analyse, il y a lieu de distinguer d'une part, la matière organique brute et sa répartition en fraction libre et en fraction liée et d'autre part, la fraction humifiée de la matière liée et la nature des composés humiques (tabl. 8).

Au niveau de l'horizon $A_1$, sous végétation naturelle (pineraie et savart), la matière organique libre est présente en grande quantité et, par ordre d'importance croissante, les sols se classent de la manière suivante : rendzines grises, rendzines brunes et rendzines rouges. Sous culture, la masse de matière organique libre diminue considérablement et oscille entre 0,5 et 1,0 p. 100. Mais s'il y a variation quantitative, il ne semble pas y avoir de variation qualitative importante, car la teneur en carbone organique de la matière organique libre reste comprise entre 15,8 et 21,4 p. 100. On peut donc considérer que cette fraction est composée des résidus végétaux dont l'importance diminue lors de la mise en culture sans modification appréciable.

La masse de la matière organique liée diminue également lorsque l'on passe de la végétation naturelle à la culture, mais dans ce cas, il y a à la fois diminution quantitative et qualitative. Le pourcentage en carbone diminue régulièrement de la pineraie à la culture. Sous pineraie, il est compris entre 4,20 et 2,95 p. 100 ; sous savart, il varie entre 3,02 et 2,10 et sous culture, entre 1,57 et 1,38.

Dans l'horizon $A_1$ la répartition des composés humiques se présente de la manière suivante : sous pineraie et sous savart, les teneurs en carbone de l'humine et des acides humiques sont pratiquement constantes quel que soit le type de rendzine. Il n'y a pas de différence sensible entre la pineraie et le savart. Sous culture, la quantité d'humine diminue en valeur absolue, mais sa teneur relative augmente.

Nous avons calculé le pourcentage de l'humine par rapport au carbone organique total. Sous pineraie, avec un rapport C/N compris entre 10 et 23 suivant les profils et les horizons, le rapport du carbone de l'humine au carbone organique total varie de 57 à 37 ; sous savart, avec des rapports C/N compris entre 9 et 18, il varie entre 50 à 78. Il y a donc une relation assez étroite entre le rapport C/N, le taux d'accumulation de l'humine et le couvert végétal. Sous culture, où les rapports C/N sont les plus faibles, le taux de l'humine est le plus élevé. La teneur en carbone total diminuant, les observations précédentes implique que, sous culture, les formes les plus polymérisées de l'humine s'accumulent.

Pour les acides fulviques, il y a lieu de noter leur importance plus grande dans les rendzines brunes et la diminution des teneurs sous culture.

Les différences les plus importantes apparaissent au niveau des acides humiques.

Il y a lieu de faire la distinction entre acides humiques bruns et acides humiques gris (tabl. 8). Sous végétation naturelle, les acides humiques bruns sont présents en quantité assez importante. Ils diminuent de manière sensible sous culture. Par contre,

TABLEAU 8

*Répartition de la matière organique et des composés humiques dans l'horizon $A_1$ des rendzines*

| Mode d'occupation | Rendzine | Matière organique libre | | Matière organique liée | | Composés humiques de la matière organique liée exprimés en carbone organique pour 100 de sol sec | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Carbone en g pour 100 g de sol | Teneur en carbone de la M.O. | Carbone en g pour 100 g de sol | Teneur en carbone de la M.O. | Humine | Acides fulviques | Acides humiques | | |
| | | | | | | | | totaux | gris | brun |
| Pineraie | Grise | 1,07 | 21,4 | 2,79 | 2,95 | 2,25 | 0,15 | 0,24 | 0,09 | 0,10 |
| | Brune | 1,55 | 18,8 | 3,28 | 3,60 | 1,96 | 0,29 | 0,02 | 0,03 | 0,10 |
| | Rouge | 2,45 | 18,5 | 3,64 | 4,20 | 2,63 | 0,20 | 0,20 | 0,03 | 0,10 |
| Savart | Grise | 0,41 | 15,8 | 2,48 | 2,54 | 1,69 | 0,20 | 0,14 | 0,03 | 0,04 |
| | Brune | 0,71 | 20,3 | 2,02 | 2,10 | 2,46 | 0,36 | 0,17 | 0,04 | 0,08 |
| | Rouge | 1,04 | 20,8 | 2,87 | 3,02 | 1,92 | 0,21 | 0,26 | 0,07 | 0,11 |
| Culture | Grise | 0,21 | 19,0 | 1,49 | 1,50 | 1,08 | 0,07 | 0,09 | 0,04 | 0,03 |
| | Brune | 0,12 | 20,0 | 1,56 | 1,57 | 1,10 | 0,19 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| | Rouge | 0,24 | 20,0 | 1,36 | 1,38 | 1,06 | 0,11 | 0,06 | 0,02 | 0,02 |

la teneur en acides humiques gris reste sensiblement constante quel que soit le mode d'occupation du sol.

On peut donc penser que les acides humiques sont constitués de fractions de stabilité très différentes : les acides humiques gris très polymérisés, résidus de l'humification, qui ne peuvent pratiquement plus évoluer et les acides humiques bruns, composés plus labiles, qui se décomposent partiellement lors de la mise en culture.

5. — *Évolution de la matière organique en fonction de sa biodégradabilité*

La distinction entre acides fulviques, acides humiques et humine est arbitraire car elle ne correspond pas à des fractions ayant des propriétés biochimiques définies. Dans ces conditions, il peut sembler préférable d'examiner le comportement de ces composés en fonction de leur résistance à la biodégradation (DUCHAUFOUR, 1970). Cette distinction est forcément schématique. Nous essayerons cependant de classer les composés humiques identifiés en fonction de leur stabilité en distinguant :

*a*) une fraction labile,
*b*) une fraction de stabilité moyenne,
*c*) une fraction très stable.

a) *Fraction labile.*

Cette fraction correspond essentiellement à la matière organique libre insoluble dans les réactifs alcalins. Elle a une grande importance sous couvert naturel : savart et pins où s'accumulent la fraction insoluble des débris végétaux (cellulose et lignine essentiellement). D'après DUCHAUFOUR, la lignine de la matière organique fraîche peut être rapidement oxydée et donner naissance à de l'humine. On ne doit pas considérer cette fraction comme bloquée définitivement, car le brassage mécanique réalisé lors de la mise en culture, ainsi que l'apport d'éléments minéraux, azote, acide phosphorique et potasse peut provoquer très rapidement sa disparition ainsi que le prouve sa faible importance sous culture.

b) *Fraction de stabilité moyenne.*

Dans cette fraction, nous trouvons les acides fulviques dont la présence est constante quels que soient le type de sol et le mode d'occupation du sol. Les acides fulviques semblent résulter de l'insolubilisation au contact de la phase minérale « des précurseurs solubles » originaires des litières. Dans le milieu biologiquement actif, aéré, et largement pourvu en calcium que représente la rendzine, les molécules d'acides fulviques peuvent se minéraliser entièrement ou se polymériser très rapidement par décarboxylation et former avec l'argile des complexes argilo-humiques totalement stables, résistant aux processus d'entraînement (BRUCKERT, 1970), ce qui expliquerait que lors de la mise en culture ces produits persistent dans le sol.

Dans cette fraction, nous trouvons également les acides humiques bruns des rendzines grises et rouges qui réapparaissent lors de la mise en culture, alors qu'ils étaient inexistants ou présents en très faible quantité lorsque le sol était occupé par une végétation naturelle. Deux possibilités peuvent être envisagées : une néoformation d'acides humiques bruns résultant de la polymérisation rapide de composés hydrosolubles (ANDREUX, JACQUIN, METCHE, 1970), ou bien une évolution à partir des acides fulviques peu résistants à la biodégradation microbienne que favoriserait la mise en culture du sol.

c) *Fraction très stable.*

Elle est représentée par les acides humiques gris très polymérisés et par une fraction de l'humine dont l'importance varie en fonction de la nature du couvert végétal ainsi que nous l'avons vu précédemment. Sous culture, bien que la quantité d'humine diminue en valeur absolue, le pourcentage du carbone de l'humine représente une fraction de plus en plus importante du carbone organique total. On peut donc considérer que c'est la forme la plus condensée de l'humine qui s'accumule alors que la forme la moins condensée, très proche de la matière organique fraîche est biodégradée.

## VI. — CONCLUSIONS

Le climax d'occupation des sols de la Champagne crayeuse est le « Savart », c'est-à-dire une steppe à graminées, où la matière organique libre est en faible proportion : 3 à 5 p. 100 de la masse du sol ; où la matière organique liée est encore plus faible : 1 p. 100 au maximum. Dans cette matière organique, la forme prédominante est l'humine, puisque le carbone de l'humine représente 50 à 70 p. 100 du carbone organique total. Dans ces sols excessivement calcaires, où la faune du sol est relativement pauvre, la présence de calcaire en quantité très importante favorise l'insolubilisation très rapide des composés organiques solubles résultant de la décomposition de la strate herbacée.

A ce stade, il semble possible de distinguer :

— les rendzines grises et rouges qui ont un taux de carbone de l'humine supérieur à 60 p. 100 du carbone organique total,

— les rendzines brunes avec une teneur en carbone de l'humine comprise entre 50 et 60 p. 100;

— au niveau des acides humiques très polymérisés (acides humiques gris), l'étude des courbes d'absorption de la lumière (UV et visible) montre que le degré de polymérisation est plus avancé pour les rendzines rouges que pour les rendzines grises, ce qui pourrait être une indication en faveur d'un stade d'évolution plus avancé des composés humiques des rendzines rouges.

A partir de ce climax représenté par le savart, deux évolutions sont possibles suivant le mode d'exploitation du sol :

— mode ancien, plantation de bois de pins. Dans ces conditions, il ne se produit pas d'évolution, par suite du brassage réduit des horizons et des processus d'insolubilisation chimique sous l'action du calcium, des composés solubles originaires de la litière. On observe une accentuation des phénomènes d'accumulation de la matière organique libre, avec accumulation des fractions de stabilité moyenne : acides humiques bruns, humine, et des fractions très stables : acides humiques gris ;

— mode actuel, culture intensive. *La matière organique libre disparaît presque totalement, la quantité d'humine diminue en valeur absolue, mais le pourcentage de l'humine par rapport au carbone organique total augmente,* ce qui indique que dans ce groupe de composés de stabilité moyenne, ce sont les fractions les plus stables qui s'accumulent.

Le carbonate de calcium des rendzines exerce une action importante et complexe (DUCHAUFOUR, 1970) qui peut expliquer une partie des faits observés dans cette étude, en favorisant :

— l'accélération des processus d'insolubilisation chimique des composés solubles originaires des litières, acides fulviques et « humine jeune » particulièrement importants sous végétation naturelle,

— l'oxydation enzymatique qui transforme la lignine en humine insoluble. Nous avons vu que c'était la forme prédominante de la matière organique humifiée dans ces sols,

— les premières phases de la condensation des acides fulviques et humiques. Nous avons constaté que les acides humiques bruns des rendzines rouges et grises présents sous culture, n'existent pratiquement pas lorsque le sol est laissé sous végétation spontanée.

Il favorise également l'activité biologique globale qui se traduit par la disparition de la fraction libre de la matière organique lors de la mise en culture. L'effet mulch de la matière organique abandonnée à la surface du sol se trouve supprimé lorsque cette même matière organique est incorporée dans le sol lors des façons culturales.

*Reçu pour publication en juin 1972.*

## SUMMARY

### IDENTIFICATION OF THE DIFFERENT KINDS OF ORGANIC MATTER IN THE SOILS OF THE CRETACEOUS « CHAMPAGNE »

After having presented the main types of soils developed on chalk, the distribution of the kinds of organic matter according to the vegetal coverage (pine-lands, « savarts * » culture) has been studied for each kind of soil.

The distribution of humic, fulvic acids and humic acids is given in detail for each of the free and linked fractions of organic matter. The importance of humine and the difference between grey humic acids of grey rendzines and red rendzines has been clearly explained. The influence of the pedological type and vegetal coverage on the distribution of forms of organic matter in $A_1$ pedological levels has been studied as well as the evolution of organic matter in terms of bio-degradation capabilities.

* Steppe of gramineae.

## ZUSAMMENFASSUNG

### IDENTIFIZIERUNG DER FORMEN DER ORGANISCHEN STOFFE IN DEN BODEN DER « CHAMPAGNE CRAYEUSE »

Nach einer kurzen Übersicht der Bodentypen, die sich auf Kreidegesteinen entwickeln, wird für diese einzelnen Bodentypen die Verteilung der Formen der organischen Stoffe in Abhängigkeit der Bodenbewachsung : Fichtenwald, Heide, Acker-untersucht.

Die Verteilung des Humins, der Fulven-und Huminsäuren wird für jede freie und gebundene Bruchteile der organischen Stoffe festgelegt. Die Bedeutung des Humins wird hervorges-

trichen sowie der Unterschied zwischen den grauen Huminsäuren der grauen und der roten Rendzine. Der Einfluss der Bodentype und der Bewachsung auf die Verteilung der Formen der organischen Stoffe im Horizont $A_1$ wird dann untersucht und der Werdegang der organischen Stoffe wird in Abhängigkeit seiner Bioabbaubarkeit angedeutet.

## РЕЗЮМЕ

Идентификация форм органического вещества в почвах меловой Шампани.

Ж. МЮЛЛЕР, при техинческом сотрудничестве Ж. ВИССЕЙШ.

Данная работа начинается с описания главных типов почв расположенных на меловых образованиях и изучения распределения, в каждой из этих почв, форм органического вещества, в зависимости от растительного покрова : сосняк, целина, культуры.

Распределение гуминов, фульво-кислот и гуминовых кислот уточняется для каждой свободной и связанной фракции органического вещества. Указываются важность гумина и различия существующие между серыми гуминовыми кислотами серых и красных рендзинов. Изучается также влияние педологического типа и растительного покрова на распределение органического вещества по горизонту $A_1$ и уточняется эволюция органического вещества, в зависимости от его способности к биодеградации.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDREUX F., JACQUIN F., METCHE M., 1970. Étude de la minéralisation et de l'humification biologique d'autolysats foliaires de Juglans Régia. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **270**, 3017-3020.

BUTLER J. M. A., LADD J. N., 1969. Effect of extractant and molecular size on the optical and chemical properties of soil humic acid. *Austral. J. Soil Res.*, **7**, 229-239.

DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1966. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. Éc. nation. sup. agron. Nancy*, **8** (1), 1-24.

DUCHAUFOUR Ph., 1970. Humification et Écologie. *Cah. O. R. S. T. O. M.*, sér. Pédol., **8**, nº 4, 379-390.

DUTIL P., BALLIF J.-L., 1968. Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés. *Sci. Sol*, **2**, 79-91.

DUTIL P., 1970. Caractères généraux des sols de la Champagne crayeuse. *95e Congrès national des Sociétés savantes*, Reims.

GRAFFIN Ph., MONNIER G., JEANDET C., 1970. Comparaison de deux méthodes de dosage du carbone organique, appliquées à l'étude de la matière organique des sols ou de ses différentes fractions. *Ann. agron.*, **21**, 315-324.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13** (1), 55-63.

A. R. E. A. R., 1970. Le déboisement en Champagne crayeuse au cours des deux dernières décennies. *Publication Atelier Régional d'Études Économiques et d'Aménagement Rural. Région Champagne-Ardennes.* Ministère de l'Agriculture.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 611-620.

# POSSIBILITÉS D'UTILISATION D'UN SYSTÈME ANALOGIQUE POUR L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE DIFFUSION

M. VILAIN

*Station agronomique, I. N. R. A.,*
*62000 Arras*

## RÉSUMÉ

Les difficultés de résolution des équations différentielles et les calculs numériques opérés à partir des solutions obtenues sont souvent multiples.

On peut établir une analogie entre la diffusion de divers fluides : chaleur, électricité, gaz. Partant de cette analogie, le principe d'un calculateur et sa réalisation sont exposés. Le calculateur est utilisé pour l'étude de la diffusion des gaz dans le sol et plus particulièrement dans le cas de milieux hétérogènes.

Des perspectives pour la résolution d'autres problèmes sont indiquées grâce aux possibilités offertes par l'introduction de composants particuliers (varistance, transistor, etc.).

## INTRODUCTION

Beaucoup de processus dynamiques concernant le sol, comme la diffusion, sont justifiables de lois physiques fondamentales souvent exprimées sous forme d'équations différentielles. La résolution de telles équations, lorsque les conditions aux limites sont exprimées, s'avère parfois difficile ; la formulation mathématique rend les calculs numériques longs et fastidieux.

Ainsi, par exemple, dans l'étude de la diffusion des gaz dans le sol, on applique à ce phénomène une équation du type :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (1)$$

C : concentration,
D : coefficient de diffusion,
$t$ : temps,
$x$ : distance.

La solution d'une telle équation peut prendre la forme d'un développement en série. Dans le cas des études poursuivies en notre laboratoire, la forme souvent retenue est :

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = 1 - \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}[1/2n - 1)]\, n\beta x \exp - \beta^2 D t.$$

$$\beta = \left(\frac{2n-1}{2L}\right)$$

L : longueur du matériau participant à la diffusion mesurée dans la direction de celle-ci ; $0 < x \leqslant L$

$n = 1, 2, 3 \ldots \infty$

Une telle expression est assez difficile à manier sans le recours des machines à grande capacité. Cette difficulté peut être palliée dans le cas présent par la construction d'un dispositif de calcul analogique.

## I. — PRINCIPE ET RÉALISATION D'UN CALCULATEUR

### 1. — *Principe*

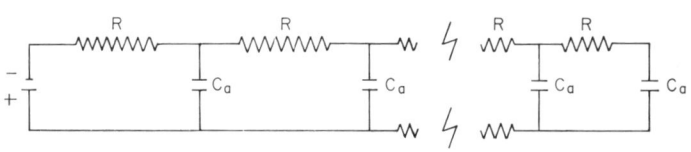
L'étude de la transmission de la chaleur dans un corps, de la charge électrique dans un circuit non inductif, conduit à des expressions mathématiques de forme analogue à l'équation (1). En particulier, dans le cas de la transmission de charges électriques le long d'un câble conducteur linéaire, isolé à chaque extrémité, dont la résistance et la capacité sont distribuées uniformément sur la longueur, sans inductance, on peut appliquer au phénomène une équation du type :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{RCa}\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \qquad (2)$$

V : potentiel électrique à la distance $x$ et au temps $t$,
$t$ : temps (sec.),
R : résistance distribuée par unité de longueur,
C$a$ : capacité distribuée par unité de longueur,
$x$ : longueur mesurée le long du câble.

On peut remarquer que l'équation (1) est identique dans sa forme à l'équation (2) ; V remplace C, et $\frac{1}{RCa}$ remplace D, etc.

Évidemment un tel câble est idéal mais on peut construire un circuit dont les caractéristiques se rapprochent de ce cas théorique en associant des cellules constituées de résistances et capacités de la façon suivante :




On démontre (Hanks et Bowers, 1960) que le potentiel en un point d'un tel circuit est une solution de l'équation mathématique (2).

Une correspondance peut être établie entre les différentes grandeurs ; elle introduira certains facteurs d'échelle reliant V à C (concentration), D à RC$a$.

Le circuit est réalisé de manière à rendre possible la variation de R et C$a$, donc aussi du produit RC$a$ ; on aura ainsi constitué un calculateur analogique permettant la résolution de telles équations. Il offrira certains avantages : entre autres, on pourra, dans le cas de phénomènes très lents, raccourcir le temps de simulation ou, au contraire, dans le cas de phénomènes très rapides, opérer une dilatation du temps par des modifications de facteurs d'échelle.

Une simulation pourra être répétée autant de fois que cela s'avère nécessaire. De plus, l'une des difficultés dans la résolution étant parfois d'exprimer mathématiquement les conditions aux limites, il arrive souvent que cela soit plus facile avec le système électrique.

### 2. — *Réalisation du calculateur analogique*

L'ensemble des raisons invoquées précédemment, ainsi que certains autres exposées ultérieurement (étude en milieux hétérogènes), a conduit à construire un calculateur analogique dont la structure est la suivante :

Il se compose de 24 cellules, chacune constituée d'une série de résistances, l'ensemble pouvant varier de 0 à 11 MΩ, d'une manière continue entre 0 et 1 MΩ, puis par bonds successifs de 1 MΩ, et d'une série de capacités variant de 0 à 10 MF par bonds de 1 MF.

Les résistances de 1 MΩ sont définies à $\pm$ 5 p. 100, elles ont été triées dans un lot important, certaines ont même été ajustées autour de la valeur 1 MΩ, par adjonction de résistances additionnelles. Les condensateurs sont définis à $\pm$ 10 p. 100 avec une constante de temps élevée afin de rendre les fuites négligeables.

L'ensemble comporte donc 240 résistances de 1 MΩ et 24 potentiomètres de 0 à 1 MΩ, ainsi que 240 condensateurs de 1 MF.

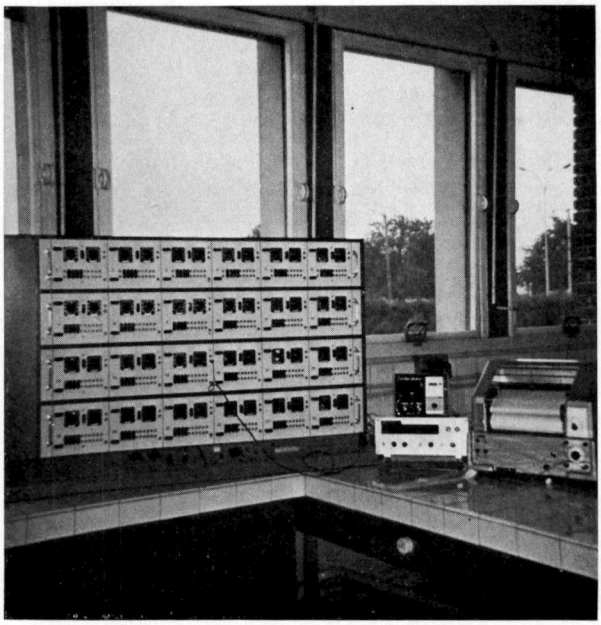


FIG. 1. — *Vue d'ensemble du dispositif*

On dispose d'une source de tension réglable (0-1 000 mV), un dispositif permet de connecter simultanément les cellules les unes aux autres au départ de l'expérience, et de décharger les condensateurs par mise à la terre.

Un circuit annexe rend le réglage facile de la valeur de R entre 0 et 1 MΩ.
Un autre permet le réglage du produit RC d'un circuit par mesure du temps de charge de celui-ci.

Les mesures de la tension sont possibles à la sortie de chacune des 24 cellules ; elles sont effectuées avec un millivoltmètre à très haute impédance (utilisation d'un pH-mètre). Celui-ci est suivi d'un enregistreur analogique auquel on peut adjoindre un intégrateur (fig. 1).

La diffusivité $D = \frac{1}{RCa}$ peut varier entre $\infty$ et 0,009. Seul le produit RC*a* est à considérer, ce qui permet de choisir et de ne faire varier que R ou C*a* dans la majorité des cas.

L'ensemble est maintenu à température constante 25°C afin d'éviter les fluctuations sur les valeurs de R et C*a*.

Un tel analyseur ne saurait prétendre rivaliser avec d'autres dispositifs plus puissants existants (Société Géopétrole, C. F. P. : 50 mailles, I. F. P. : 150 mailles). Il permet cependant une approche raisonnable des problèmes envisagés comme le prouvent les exemples rapportés.

## II. — UTILISATION DU CALCULATEUR

L'ensemble a été conçu en vue de nos études sur la diffusion des gaz dans le sol. Il permet, connaissant les valeurs de D, de simuler un processus de diffusion dans un sol en choisissant, par exemple, un facteur d'échelle tel qu'une cellule représente une couche de 1 cm ; on a alors la possibilité de suivre à tous les niveaux les variations de la tension. Toutes nos études tendent à relier le coefficient de diffusion apparent aux caractéristiques du milieu. Il présente dans ce cas un avantage important puisqu'il nous permet de simuler un « profil de sol » très homogène.

Les valeurs des coefficients étant affichées sur le calculateur à l'aide des résistances et capacités, on procède à la charge du circuit ; il est possible de suivre de manière permanente la variation de la tension aux bornes d'une cellule, tension qui est analogue dans nos expériences à une concentration.

On peut également utiliser l'appareil pour rechercher la valeur du coefficientde diffusion par une méthode « par coups et essais », en affichant sur le calculateur des coefficients tels que ses sorties soient en accord avec les résultats de l'expérience à simuler.

Si le phénomène à étudier dure plusieurs heures, il est possible de le simuler en un temps plus réduit en choisissant une constante de diffusivité électrique qui soit par exemple 10 fois supérieure à celle du phénomène. Le temps total d'expérimentation s'en trouvera accéléré de 10 fois, l'expérience durera alors moins de 15 minutes.

Il est souhaitable d'éviter d'opérer sur des temps de charges trop longs afin de réduire les erreurs dues à la décharge par les résistances de fuite des condensateurs.

On a cherché à établir la reproductibilité (tabl. 1) et l'exactitude (tabl. 2) du dispositif.

*Exemple de reproductibilité* :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Expériences | $A_1$ | R = 0,15 M | C = 5 MF | |
| | $A_2$ | R = 0,15 M | C = 5 MF | RC ≠ 0,75 sec. |
| | $A_3$ | R = 0,15 M | C = 5 MF | |
| | B | R = 0,25 M | C = 3 MF | RC ≠ 0,75 sec. |

TABLEAU I

*Valeurs des tensions en mV*

| Temps | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | B |
|---|---|---|---|---|
| *Cellule 18* | | | | |
| 1 mn | 102 | 103 | 102 | 107 |
| 2 mn | 174 | 175 | 174 | 179 |
| 3 mn | 201 | 201 | 201 | 215 |
| *Cellule 18* | | | | |
| 1 mn | 138 | 138 | 138 | 142 |
| 2 mn | | | | |
| 3 mn | 192 | 190,5 | 191 | 197 |
| *Cellule 6* | | | | |
| 0,5 mn | 160 | 162 | 161 | 162 |
| 1 mn | 188 | 189 | 189 | 191 |
| 2 mn | 218 | 219 | 218 | 220 |

On peut noter la bonne reproductibilité pour les expériences $A_1, A_2, A_3$. Le fait que toutes les valeurs de B soient légèrement supérieures à celles des ensembles A, résulte de la construction de l'appareil. Lors de la réalisation, les capacités ont été comparées entre elles et disposées dans les cellules par ordre croissant. Donc la capacité totale utilisée dans l'expérience A est légèrement plus élevée que la valeur indiquée, la diffusivité est donc plus faible dans cette série.

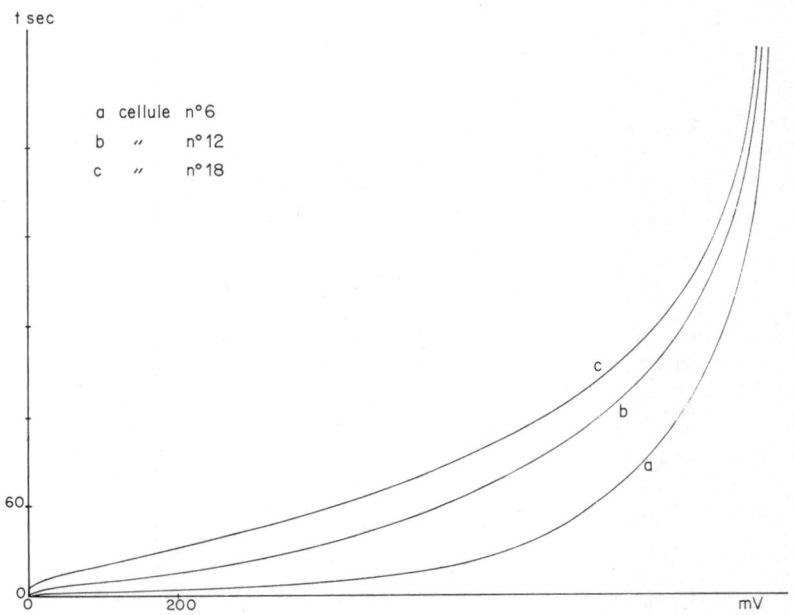



FIG. 2. — *Simulation d'un milieu homogène*

Dans cette expérience, on n'a pas cherché à régler précisément le produit RC*a* à la valeur 0,75 en agissant sur R comme cela eût été possible en compensant les écarts existants sur les valeurs des composants ; on a retenu les seules valeurs indiquées de R et C*a* (fig. 2).

*Exactitude du dispositif :*

TABLEAU 2

*Étude des erreurs découlant de l'utilisation d'un type déterminé de composant*

| Valeur affichée sur toutes les cellules | RC = 1 | RC = 5 |
|---|---|---|
| Valeurs calculées d'après les tensions mesurées | | |
| Cellule 6 | 1,01 | 4,71 |
| Cellule 12 | 1,06 | 4,71 |
| Cellule 18 | 1,04 | 4,80 |
| Cellule 24 | 1,04 | 4,80 |
| *Moyenne* | 1,04 | 4,75 |
| Écart maximum à la moyenne (%) | 4 | 6 |

L'erreur est naturellement fonction de la qualité du matériel engagé dont la plus mauvaise définition est celle des condensateurs (l'utilisation de condensateurs définis à $\pm$ 5 p. 100 conduirait à sextupler le prix de la réalisation).

A titre d'exemple, notons la concordance entre les résultats expérimentaux d'une diffusion de gaz sur un matériau poreux homogène et ceux obtenus par l'utilisation du dispositif :

TABLEAU 3

| *Milieu poreux* | | | *Simulation* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Coefficient de diffusion apparent : 0,13 $\pm$ 0,006 cm²/s<br>Porosité totale : 0,377<br>Prof. 6 cm | | | R = 0,15 MΩ C = 5 MF<br>Diffusivité : 1,3 RC = 0,75 s<br>Prof. 18 cm | | |
| | $C/C_0$ | $V/V_0$ | | $C/C_0$ | $V/V_0$ |
| 8 s | 0,584 | 0,590 * | 12 s | 0,252 | |
| 15 s | 0,697 | | 20 s | 0,425 | 0,439 * |
| 28 s | 0,808 | 0,822 * | 31 s | 0,620 | |
| 40 s | 0,884 | 0,886 * | 43 s | 0,737 | 0,752 * |
| 50 s | 0,900 | 0,922 * | 53 s | 0,816 | |
| 66 s | 0,955 | | 69 s | 0,899 | 0,906 * |
| 80 s | 0,959 | 0,977 * | 84 s | 0,930 | |

(*) Valeurs obtenues en temps réduit (1/10).

On peut constater la bonne correspondance d'ensemble, ceci d'autant plus qu'il est très difficile de s'assurer de l'homogénéité parfaite du milieu poreux.

## III. — POSSIBILITÉS ET PERSPECTIVES D'UTILISATION

Le dispositif construit permet facilement la variation de la diffusivité de chaque cellule. Il est possible de l'utiliser pour simuler les problèmes en milieux hétérogènes dont la réalisation pratique sur modèle est extrêmement difficile. Ces problèmes n'ont été que très peu abordés, suivant l'opinion de CRANK (1964) :

« *Little attention has been paid to diffusion in non-homogeneous media in which the diffusion coefficient vary with distance measured in the direction of diffusion apart from the special cases relating to composite sheets, cylinders and spheres.* »

Le développement de puissants moyens de calculs permet cependant la résolution de problèmes de ce type soit directement, soit par l'utilisation de techniques d'approximation.

La méthode retenue permet d'aborder des problèmes où le coefficient D varie sur tout le profil, en réglant les produits $RC_a$ dans le sens souhaité. La résolution d'une équation différentielle du type ci-dessous est alors possible.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D f(z) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$z$ étant une variable qui n'est pas liée à la concentration C, mais peut être une fonction de $x$.

A titre d'exemple, la figure 3 présente les courbes obtenues pour un profil ainsi constitué :

| | | |
|---|---|---|
| Cellule 0 à 8 | D = 1,33 | (Ca = 5 MF ; R = 0,15 M) |
| Cellule 8 à 14 | D = 1,19 | (Ca = 4 MF ; R = 0,21 M) |
| Cellule 14 à 24 | D = 1,33 | (Ca = 5 MF ; R = 0,15 M) |

Le facteur d'échelle du temps est 10.

Cet exemple correspond à un cas réel étudié au laboratoire. Il s'agit d'une diffusion dans un milieu poreux hétérogène comprenant une couche moins diffusante (8 — 14) constituée d'un mélange de billes de verre (21,6 p. 100 de billes de verre de diamètre inférieur à 0,08 mm et 78,3 p. 100 de diamètre moyen 1,5 mm) (VILAIN et DRUELLE, 1970).

La porosité minimum d'une telle couche est de 0,18, le coefficient de diffusion du gaz D = 0,021 $cm^2/s$ et le coefficient apparent de diffusion $D' = 0{,}021/0{,}18 = 0{,}119$ $cm^2/s$. C'est une valeur proportionnelle qui a été affichée sur le calculateur $1/RCa = D' \times 10$.

On remarque le tracé très régulier des courbes (fig. 3). La comparaison avec les courbes précédentes (fig. 2), permet l'étude de l'accroissement de la vitesse de diffusion dans la partie supérieure adjacente à la couche (8-14) et la réduction correspondante pour la partie sous-jacente (14-24).

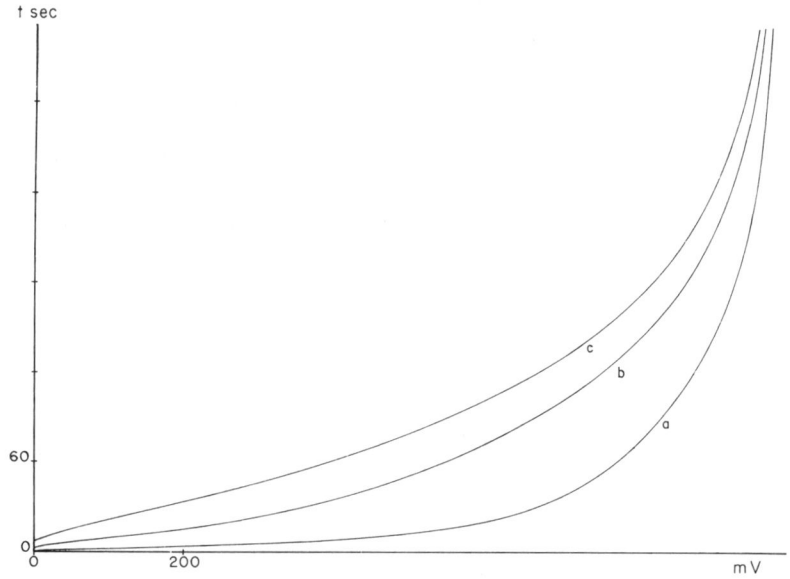



FIG. 3. — *Simulation d'un milieu hétérogène*

L'appareil construit sera particulièrement utilisé pour l'étude de la diffusion des gaz dans des milieux hétérogènes. On envisage l'étude des cas tels que :

— milieu où D′, coefficient apparent, varie en fonction de la profondeur
suite à une variation de porosité totale,
suite à une variation de porosité accessible au gaz (en fonction des variations du profil hydrique) ;

— milieu constitué de deux ou plusieurs couches.

Un tel dispositif pourra être utilisé aussi pour d'autres études, comme la résolution des problèmes de transmission de la chaleur dans le sol, en alimentant le calculateur par une source dont la tension reproduit la fonction à simuler ou pour des études de transfert des éléments minéraux par diffusion au niveau de la racine.

On doit cependant se rappeler que, par construction, les composants R et C*a* imposent un coefficient D indépendant de la tension, ce qui exclut *a priori* l'utilisation pour la résolution d'équation du type

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$$

où D n'est plus une constante. Ce cas se rencontre en particulier dans les études sur la circulation de l'eau où $\theta$ représente alors l'humidité. D'après GARDNER (1956-1958), D peut se traduire par une relation de la forme

$$D = D_0 \exp \beta (H - H_0) ;$$

H et $H_0$ représentent des humidités, $D_0$ la valeur de D pour $H = H_0$, $\beta$ = une constante.

On peut envisager une extension des possibilités de l'analyseur en introduisant

des éléments résistants à variations non linéaires en fonction de la tension, du type varistance (résistance variable avec la tension) ou élément semi-conducteur (transistor à effet de champ). Un tel dispositif pourrait alors permettre l'approche de problèmes tels que le précédent.

## IV. — CONCLUSION

Il apparaît que cette technique et l'utilisation d'un tel dispositif peuvent contribuer à la résolution de nombreux problèmes et ceci même à l'époque des calculateurs très perfectionnés.

En effet, le matériel proposé reste d'un coût modeste ; il présente une simplicité de manipulation très grande et une souplesse d'adaptation importante. L'utilisation d'un calculateur analogique ne paraît pas dépassée, même en face de moyens puissants de calculs numériques.

*Reçu pour publication en mai 1972.*

## SUMMARY

### POSSIBLE APPLICATION OF AN ANALOGICAL SYSTEM FOR INVESTIGATING DIFFUSION PHENOMENA

Many are the troublesome problems involved in solving differential equations and the numerical computations derived from the relevant solutions.

Some similarity can be made between the diffusion of various fluids, *i. e.*, heat, electricity and gases. On the basis of such similarity the theory of operation and design of a computer are set forth herein. The latter is used for investigating the diffusion of gases in soils, more especially those involving heterogeneous media.

In this frame of reference, the potentialities of components, such as varistors, transistors, are also gone into.

## ZUSAMMENFASSUNG

### MÖGLICHKEITEN DER VERWENDUNG EINES ANALOGIE-SYSTEMS FÜR DIE UNTERSUCHUNG DER DIFFUSIONS-ERSCHEINUNGEN

Die Schwierigkeiten der Lösung der Differential-gleichungden und die numerischen Rechenoperationen mit den daraus erhaltenen Resultaten sind oftmals bedeutend.

Es ist möglich, eine Analogie zwischen der Diffusion von verschiedenen Strömungen aufzustellen : Wärme, Elektrizität, Gas. Von dieser Analogie ausgehend wird das Prinzip einer Rechenanlage, fermer dessen Realisierung beschrieben. Die Rechenanlage wird für die Untersuchung der Gasdiffusion im Boden, insbesondere im Falle von heterogenen Zuständen erwendet.

Perspektiven für die Lösung anderer Problem werden dank der durch Einführung von besonderen elektronischen Komponenten gebotenen Möglichkeiten (Varistanz, Transistor u. s. w.) angegeben.

## РЕЗЮМЕ

Возможность применения аналогической системы для изучения явлений диффузии.

М. ВИЛЕН.

Трудности решения дифференциальных уравнений, и числовые рассчеты которые необходимо проделывать исходя от полученных результатов, бывают часто слишком многочисленными.

Но есть возможность провести аналогию между диффузией разных флюидических тел : теплота, электричество, газ... Исходя из этой аналогии излагается принцип вычислительного аппарата, и его реализации. Счетчик этот может найти применение при изучении диффузии газов в почвах и, в частности, в случаях гетерогенности среды.

Указываются возможности разрешения иных задач при помощи введения особых составных (транзистор и. т. д.).


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


CRANK J., 1964. *The Mathematics of diffusion.* Oxford, Clarendon Press, 147-185.

GARDNER W. R., 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 317-320.

GARDNER W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soil. *Highway Research board.*, S. R., **40**, 78-87.

HANKS R. J., BOWERS S. A., 1960. Non steady state moisture, temperature and soil air pressure approximation with an electric simulator. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 247-256.

PASCHKIS V., BAKER H. D., 1942. A method for determining unsteady state heat transfer by means of an electrical analogy. *Transaction of the A. S. M. E.*, 105-112.

SANDERS F. E., TINKER P. B., NYE P., 1970. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. I. An electrical analogy of diffusion to root systems. *Plant and Soil*, **34**, 453-456.

VILAIN M., DRUELLE J.-P., 1970. Détermination du coefficient de diffusion de l'oxygène dans un milieu poreux non consolidé sec et à saturation variable. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **271**, 2090-2093.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 621-653.

# ÉTUDE DE QUELQUES LOIS RÉGISSANT LA POROSITÉ DE MATÉRIAUX MEUBLES

J.-C. FIÈS, S. HÉNIN et G. MONNIER
avec la collaboration technique de C. JEANDET

*Station d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78000 Versailles*

## RÉSUMÉ

Cette étude a pour objet la porosité texturale, fraction de la porosité totale qui ne revèle que de la seule disposition relative des particules élémentaires présentes.

Des valeurs de cette porosité, mesurées sur des mélanges binaires de différents matériaux, sont confrontées à celles calculées à partir de modèles théoriques explicitant des lois d'arrangement entre les particules.

Deux lois simples rendent compte des variations extrêmes de porosité texturale, à partir des seules valeurs de porosité initiale de chacune des classes utilisées:

— la loi de non interaction, où la porosité du système évolue de façon continue entre les valeurs limites des porosités initiales;

— la loi d'interaction simple, où la porosité du système passe par un minimum très marqué par rapport aux valeurs des porosités initiales.

A l'intérieur du domaine ainsi borné, un modèle théorique continu fait intervenir des effets de perturbation dans l'arrangement des constituants, rendant compte des valeurs observées de porosité. Dans le cas de seules interactions stériques entre les constituants, les paramètres de perturbation dépendent, selon une loi empirique, de la taille des éléments. Pour des matériaux terreux soumis à une histoire hydrique, une interaction physique, liée à une organisation de l'argile autour des éléments du squelette, se substitue à l'effet d'encombrement, rendant difficile l'interprétation des paramètres de perturbation.

## INTRODUCTION

La porosité totale d'un sol en place, c'est-à-dire la partie du volume apparent unitaire qui n'est pas occupée par la phase solide, peut être considérée comme la caractéristique mesurable la plus globale de son état physique.

Toutefois, pour être interprétable, tant du point de vue de son rôle vis-à-vis

du fonctionnement du système que de son origine, et par là, des possibilités pratiques de la modifier, la porosité ainsi définie doit être envisagée à deux niveaux principaux :

— tout d'abord, celui de la structure du sol : les fissures entre éléments structuraux, les vides ménagés par l'arrangement des mottes et de la terre fine, les canalicules et cavernes d'origine biologique ou pédologique constituent un premier « système de porosité » que l'on peut qualifier de « structural » et qui est le résultat de l'action combinée de facteurs physiques, mécaniques, biologiques ou chimiques sur le matériau constitutif du sol;

— en second lieu, l'arrangement des particules élémentaires — celles qui sont séparées au cours de l'analyse granulométrique — définit un autre système de pores dont les caractéristiques (volume total et répartition par taille) apparaissent liées à la granulométrie du matériau selon des modalités mal connues qui, considérées dans leur ensemble, représentent l'« effet texture » ; la porosité résultante sera désignée par le terme porosité texturale.

Ce sont précisément ces relations entre la porosité d'un matériau et la granulométrie de ses constituants élémentaires que nous nous proposons d'étudier. Pour cela nous devrons, évidemment, nous limiter au cas des massifs poreux continus (1) ou particulaires (2), dépourvus de « porosité structurale ».

L'un d'entre nous (FIÈS, 1971) a récemment abordé ce sujet par la voie expérimentale. Nous tenterons ici une approche complémentaire de la précédente, basée sur la conception et l'utilisation de modèles théoriques explicitant diverses modalités de mélanges de particules de tailles différentes et leur conséquence sur la porosité (HÉNIN *et al.*, 1970).

Les travaux concernant ce sujet reposent, pour la plupart, sur des hypothèses très contraignantes concernant, entre autres, la forme des particules et la géométrie de leur disposition relative. De ce fait, leurs résultats sont difficiles à extrapoler au cas des sols dont les constituants ont des formes variées et mal définies se prêtant mal *a priori* à une schématisation trop précise. Aussi, nous sommes-nous efforcés de partir de bases aussi peu restrictives que possible.

Dans tout ce qui suit, nous considérerons chaque mélange étudié comme constitué à partir de deux classes de particules simplement qualifiées de « grossières » et de « fines ».

Nous désignerons par $B_0$ et $b_0$ respectivement les *volumes réels* que chacune de ces classes de particules occupe, lorsqu'elles sont prises séparément, au sein d'un volume apparent unitaire. Les valeurs de $B_0$ et $b_0$ sont les conséquences *supposées constantes* de l'arrangement spontané des particules constituant chacune des classes de particules, arrangement *qui est donc considéré comme caractéristique.*

Pour déterminer le volume réel total $V = B + b$ occupé dans le volume apparent de référence par un mélange des deux classes de particules, on peut envisager un certain nombre de règles susceptibles de définir leur arrangement relatif.

Nous nous proposons de les passer en revue en confrontant à chaque étape les valeurs calculées de V et de la porosité $1 - V$, aux valeurs effectivement mesurées.

(1) Les particules élémentaires du squelette limono-sableux sont cimentées par la fraction colloïdale en un ensemble cohérent non fissuré.

(2) Les constituants élémentaires sont simplement juxtaposés.

## I. — LOI DE NON INTERACTION

Une hypothèse simple consiste à admettre la simple juxtaposition des classes de particules B et $b$ quand elles sont réunies dans un même volume, sans qu'il y ait modification de l'arrangement propre à chaque classe.

Imaginons, par exemple, que le volume apparent unitaire entièrement occupé par le volume réel $b_0$ de petites particules reçoive un apport B de gros éléments.

La loi de mélange retenue se traduit par le fait que la mise en place du volume réel B entraîne le départ d'un volume réel $b'$ de petites particules, de façon telle que le *volume apparent* laissé libre par $b'$ soit égal au *volume apparent* occupé par B, ce qui s'écrit :

$$b' \times \frac{1}{b_0} = B \times \frac{1}{B_0}, \qquad \text{soit : } b' = B\,\frac{b_0}{B_0}$$

Le volume réel $b$ de petits éléments restant est égal à $b = b_0 - b'$ soit en remplaçant $b'$ par sa valeur :

$$b = b_0 - b_0\,\frac{B}{B_0} \qquad \text{ou} \qquad b = b_0\left(1 - \frac{B}{B_0}\right).$$

Le volume réel total V de particules présentes dans le système est défini par la somme des volumes réels présents $V = B + b$, soit $V = B + b_0\left(1 - \frac{B}{B_0}\right)$ ce qui peut encore s'écrire :

$$V = B\,\frac{B_0 - b_0}{B_0} + b_0 \qquad (1)$$

Connaissant les valeurs de $B_0$ et $b_0$, il est alors possible de définir V en fonction de B. La forme de la relation (1) montre que V varie linéairement de $b_0$ à $B_0$ quand B prend les valeurs comprises entre 0 et $B_0$, $B_0$ représentant par définition le volume réel maximum de particules grossières pouvant occuper le volume apparent de référence.

La pente de la droite dépend des valeurs de $B_0$ et $b_0$ et s'annule quand ces deux dernières sont égales, V conservant alors une valeur constante.

La figure 1 présente un exemple de variation théorique de V où les valeurs choisies pour $B_0$ et $b_0$ correspondent à celles mesurées sur des massifs de billes de verres de 800 $\mu$ et 50 $\mu$ de diamètres moyens respectifs. Les valeurs des volumes réels B et $b$ pour chaque valeur de V sont également représentées. On a porté en abscisses la teneur pondérale en éléments fins présents dans le mélange.

Si G représente la teneur pondérale en gros éléments, $g$ la teneur en éléments fins, $d_G$ et $d_g$ les masses volumiques respectives des éléments grossiers et des éléments fins, la valeur de B dans l'équation (1) peut se calculer à partir des relations suivantes :

$$\frac{G}{G+g} = \frac{Bd_G}{Bd_G + bd_g} \qquad \text{et} \qquad b = b_0 - b_0\,\frac{B}{B_0}$$

d'où on tire :

$$B = \frac{B_0 b_0 G d_g}{B_0 g d_G + b_0 G d_g}$$

Dans cette représentation, V est une fonction hyperbolique de la teneur en éléments

fins. Dans le cas précis présenté ici, l'arc d'hyperbole se confond en pratique avec une droite, les valeurs de $B_0$ et $b_0$ étant extrêmement proches l'une de l'autre.

Ce premier résultat ne rend pas compte du fait qu'un mélange de particules conduit souvent à un *accroissement de compacité du système*, autrement dit à des valeurs de V supérieures à la fois à $B_0$ et $b_0$. Le graphique 3 illustre par ailleurs ce phénomène mis en évidence avec deux mélanges binaires de billes : 800 μ-50 μ d'une part, 1 200 μ-50 μ d'autre part. Pour rendre compte de telles variations de V, nous sommes conduits à envisager une hypothèse d'interaction entre les particules.

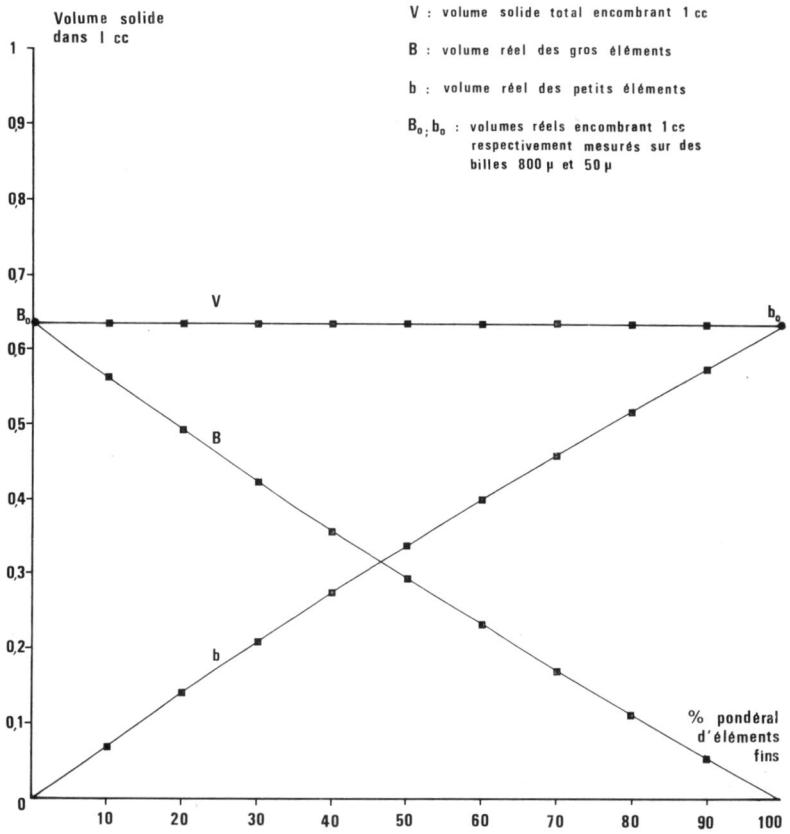



FIG. 1. — *Variation théorique du volume solide de particules encombrant un volume apparent unitaire, obtenue d'après la loi de non interaction*

## II. — LOI D'INTERACTION SIMPLE

Nous supposons maintenant l'existence d'une interaction entre les deux classes de particules mises en présence, l'arrangement propre à chaque classe n'étant toujours pas modifié lors du mélange.

Considérons à nouveau le volume unitaire occupé par un volume réel $b_0$ de petites particules. Posons comme loi d'interaction que l'introduction d'un volume

réel B de gros éléments va remplacer à la fois le volume réel $b'$ de petites particules, et l'espace poreux existant entre ces particules. La porosité totale du système va donc diminuer, ce qui répond bien au problème posé. Cette nouvelle hypothèse implique qu'un *volume apparent* occupé par $b'$ soit remplacé par un *volume réel* qui lui soit égal.

On aura donc :

$$b' \times \frac{1}{b_0} = B$$

Le volume réel $b'$ déplacé par B est égal à : $b' = Bb_0$. Le volume $b$ de petites particules restant dans le volume unitaire après l'introduction de B est donc :

$$b = b_0 - b' = b_0 - Bb_0 = b_0(1 - B)$$

Le volume réel V occupé par la matière solide encombrant le volume unitaire se définit alors de la façon suivante :

$$V = B + b_0(1 - B) \qquad (2)$$

Ce qui peut s'écrire :

$$V = b_0 + B(1 - b_0)$$

La valeur de V va donc croître linéairement en fonction de B.

Quand le volume réel occupé par les grosses particules devient égal à $B_0$, l'équation (2) atteint alors une valeur limite $V_l$

$$V_l = B_0 + b_0(1 - B_0).$$

Exprimé en terme de porosité totale, ce dernier résultat signifie que le système a atteint sa porosité minimale $P_m$.

On a :

$$P_m = 1 - V_l, \qquad \text{soit} \qquad P_m = 1 - B_0 - b_0(1 - B_0) ;$$

ce qui s'écrit encore

$$P_m = (1 - B_0)\,(1 - b_0)$$

*Cela signifie que la porosité minimale du mélange est égale au produit des porosités propres à chaque classe considérée séparément.*

Ce point atteint, si lorsque $B = B_0$, on ne peut plus escompter de variation de la fraction grossière, par contre, il est possible de faire varier la quantité d'éléments fins. En effet, ces derniers peuvent occuper une partie plus ou moins importante des vides ménagés par la fraction grossière. Ainsi, quand B est supérieur à $B_0$, on ne décrit plus, comme avec la loi de non interaction, l'évolution du système.

Dans ce nouveau domaine où B a toujours pour valeur $B_0$, $b$ peut prendre toutes les valeurs telles que :

$$0 \leqslant b \leqslant b_0(1 - B_0)$$

Quand B prend des valeurs inférieures à $b_0(1 - B_0)$, la quantité de matière solide par unité de volume ne peut plus se définir uniquement par rapport à B et la relation s'écrit alors :

$$V = B_0 + b \qquad (3)$$

Deux équations sont donc nécessaires pour représenter les variations de V. Un exemple en est donné avec la figure 2 où, comme précédemment, la teneur pondérale en éléments fins est portée en abscisse.

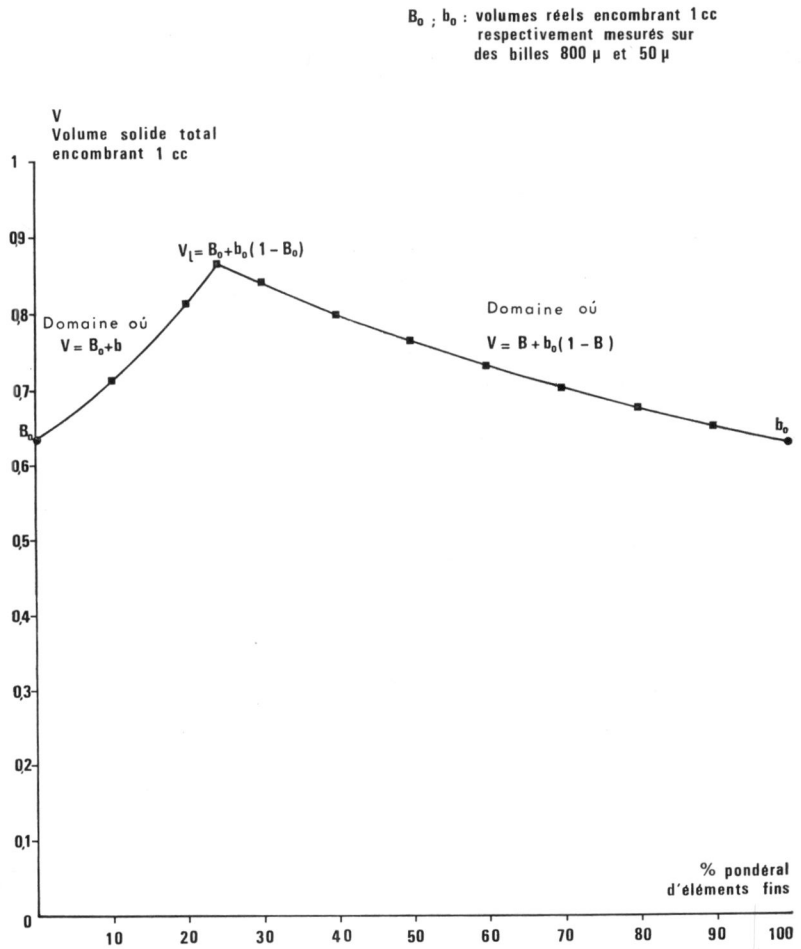



FIG. 2. — *Variation théorique du volume solide total V de particules encombrant l'unité de volume apparent, obtenue d'après la loi d'interaction simple*

Pour cette représentation, les transformations nécessaires sont les suivantes, $z$ représentant la valeur du rapport $G/g$ :

Pour l'équation (2) : $B = \dfrac{b_0 z d_g}{b_0 z d_g + d_G}$

Pour l'équation (3) : $b = \dfrac{B_0 d_G}{z d_g}$

Les valeurs de V se situent alors sur deux arcs d'hyperboles, bornés par les valeurs respectives de $B_0$ et $b_0$ caractéristiques des constituants et admettant pour valeur commune celle correspondant à la compacité maximale du système.

## III. — INTERACTION PERTURBÉE

### A. — *Étude de deux mélanges binaires de billes*

Les relations théoriques précédentes ont éte appliquées à des mélanges de billes dont nous allons étudier deux exemples constitués l'un par le mélange 800 μ-50 μ, l'autre par le mélange 1 000 μ-50 μ.

La comparaison des valeurs de V observées et calculées est représentée sur la figure 3. L'examen de ces résultats entraîne plusieurs remarques.

Tout d'abord, il apparaît que la loi d'interaction rend le mieux compte du phénomène. Cependant, es valeurs de V observées sont toujours inférieures aux

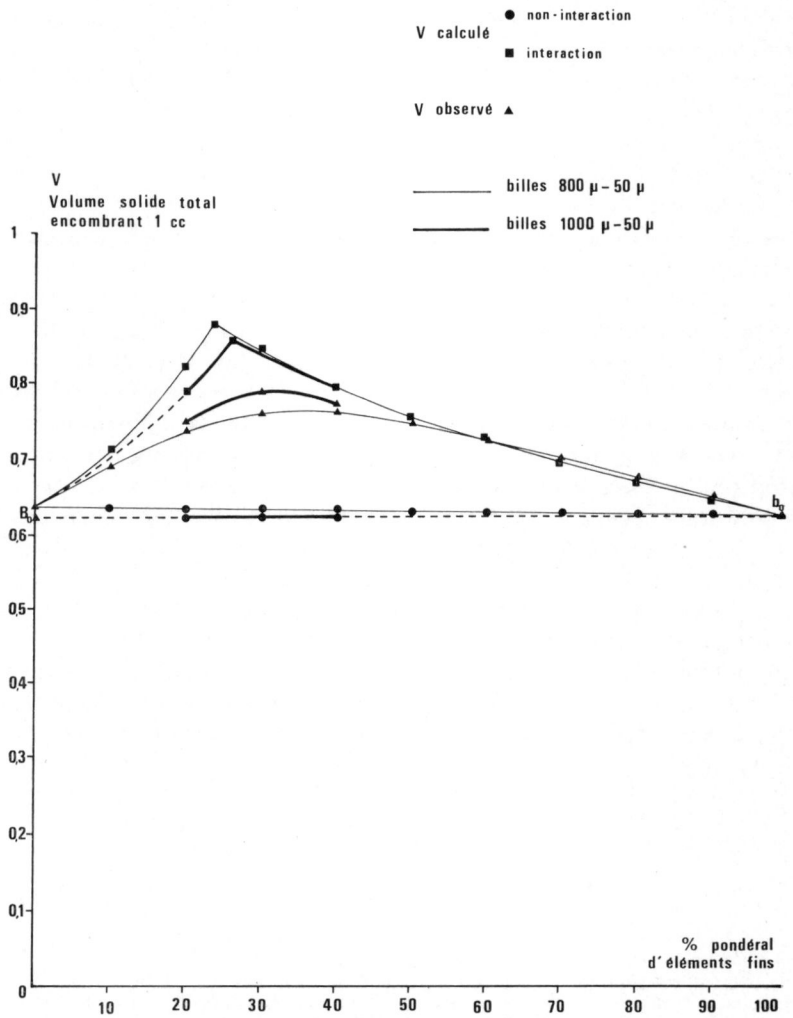



FIG. 3. — *Comparaison des valeurs expérimentales et calculées de V pour deux séries de mélanges binaires de billes*

valeurs théoriques, les écarts étant d'autant plus grands que l'on se situe au voisinage de la compacité théorique maximale.

Des deux mélanges comparés, la série 1 000 μ-50 μ se rapproche le plus des valeurs théoriques de V prévues avec la loi d'interaction simple. Nous retrouvons ici un effet déjà relevé par d'autres chercheurs dont GRATON et FRASER (1935) ; à teneur égale en constituants, un mélange est d'autant plus compact que la valeur du rapport du diamètre de grosses particules au diamètre de petites particules est élevé.

Ces premières remarques suggèrent que la loi d'interaction constitue une *limite supérieure* de la compacité que peut présenter naturellement (1) un mélange. Si l'on tient compte du fait qu'il n'y a à la base de ces calculs aucune hypothèse concernant la forme des particules ou leur mode d'arrangement au sein de chacune des classes considérées, on peut estimer que l'approximation obtenue est déjà satisfaisante.

Des facteurs internes au système et liés aux caractéristiques granulométriques et à la texture, c'est-à-dire aux propriétés propres à chaque classe de particules et à la résultante de leur interaction, déterminent par ailleurs les valeurs de V observées pour chaque mélange.

*La limite inférieure* est donnée par la loi de non interaction et correspond par exemple au cas de mélange de deux populations de particules identiques dont le rapport des diamètres est égal à 1.

Nous allons donc maintenant nous attacher à rendre compte des variations de V dans le domaine strictement limité par les deux lois précédentes. V peut ici se définir comme dépendant uniquement des caractéristiques granulométriques et texturales des matériaux mis en présence et des interactions qui en résultent au niveau de la disposition relative des particules au cours de l'opération de mélange.

Il est évident qu'une autre partie du problème, que nous n'aborderons pas ici, concerne la prévision de valeurs de V non comprises dans ce domaine et correspondant par exemple à la mise en jeu de facteurs extérieurs au système entraînant la compaction ou le foisonnement par modification des valeurs initiales de $B_0$ et $b_0$.

Si l'on considère donc maintenant le sens des écarts entre les valeurs de V observées et celles prévues par la loi d'interaction, ils signifient que l'on n'aboutit pas à un empilement de particules aussi compact que celui prévu par cette loi. L'arrangement de chaque classe de particules, jusqu'ici considéré comme constant, subit en fait une perturbation dans le sens d'un accroissement de porosité.

Cette notion de perturbation d'arrangement ressort clairement de l'examen de la figure 4 où les valeurs de B et $b$ calculées avec la loi d'interaction simple, sont comparées à celles déduites des valeurs de V obtenues expérimentalement avec le mélange 800 μ - 50 μ.

En effet, V expérimental étant connu, on a :

$$B = V \frac{G d_g}{G d_g + g d_G}$$

et

$$b = V - B$$

(1) Nous posons en postulat, rappelons-le, que les valeurs $B_0$ et $b_0$ sont des caractéristiques intrinsèques des matériaux sur lesquels elles sont mesurées et que ces valeurs représentent les limites supérieures que peuvent respectivement atteindre B et $b$ dans le système.

Quand les valeurs de V observées sont inférieures aux valeurs calculées, ce qui se présente ici pour les teneurs en éléments fins inférieures à 50 p. 100, on constate, *pour l'une et l'autre classe*, que les volumes réels présents dans le volume unitaire sont inférieurs à ceux prévus par la loi d'interaction.

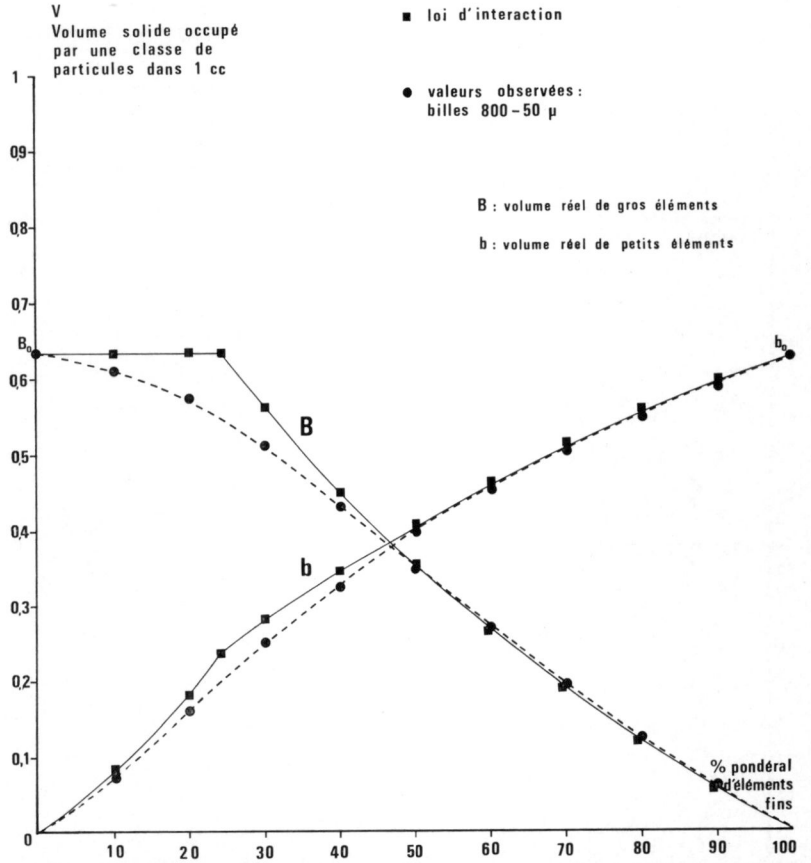



FIG. 4. — *Mise en évidence de l'effet de perturbation : comparaison des valeurs mesurées des volumes solides B et b des deux classes de particules aux valeurs prévues par la loi d'interaction simple, pour une même série de mélanges.*

Il nous faut alors considérer l'introduction d'*un effet de perturbation* au niveau des relations (2) et (3) précédentes définissant V avec la loi d'interaction.

Nous considérerons tout d'abord le cas où une seule classe de particules est affectée par une perturbation.

### B. — *Perturbation de l'arrangement des petits éléments*

On peut exprimer le phénomène de perturbation en posant que lors de l'introduction d'un volume réel B dans un massif de petites particules, tout se passe comme s'il y avait, au contact des gros éléments, une modification de l'arrangement des petits.

Dans cette hypothèse, le volume $b'$ d'éléments fins déplacés par B est alors différent de $Bb_0$.

Posons que $b' = \gamma B b_0$, $\gamma$ représentant un coefficient de perturbation des petits éléments. La relation $V = B + b_0(1 - B)$ prend alors la forme :

$$V = B + b_0(1 - \gamma B) \qquad (2')$$

Le coefficient de perturbation $\gamma$ a une signification très générale. Pour $\gamma < 1$, il y

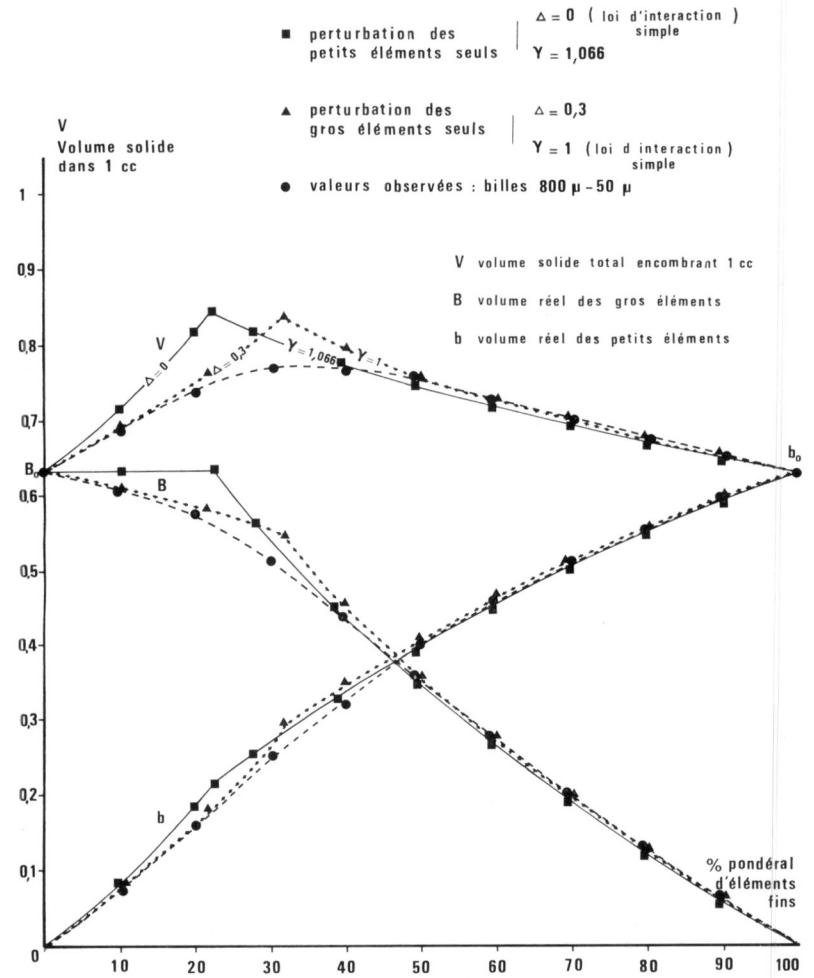



FIG. 5. — *Essai d'ajustement des valeurs théoriques aux valeurs expérimentales de B et b, par utilisation des coefficients* $\Delta$ *ou* $\gamma$ *de perturbation de l'arrangement des éléments grossiers ou fins*

aurait compactage du système et pour $\gamma > \frac{1}{B_0}$, foisonnement. Dans le domaine des variations que nous étudions, $\gamma$ doit être tel que :

$$1 \leqslant \gamma \leqslant \frac{1}{B_0}$$

En effet, pour $\gamma = 1$, nous retrouvons la loi d'interaction. Pour $\gamma = \frac{1}{B_0}$, nous atteignons alors pour V la valeur correspondant à l'hypothèse de non interaction.

On peut remarquer dans ce dernier cas, que l'on peut substituer à l'image de juxtaposition, celle d'une certaine interaction où les petits éléments viendraient se loger entre les gros. Alors que dans l'hypothèse de non interaction il s'agit d'un mélange « mal fait », on considère ici un matériau parfaitement homogène.

A partir du mélange à compacité maximale, correspondant à :

$$V_{l\gamma} = B_0 + b_0(1 - \gamma B_0)$$

nous pénétrons dans le domaine défini par la relation $V = B_0 + b$. Selon la valeur donnée à $\gamma$, le domaine d'application de cette expression s'étendra aux valeurs de $b$ comprises entre $b = 0$ et $b = b_0(1 - B_0)$ pour $\gamma = 1$, ou se limitera au cas où $V = B_0$ pour $\gamma = \frac{1}{B_0}$.

La figure 5 illustre les prévisions de V, B et $b$, obtenues dans cette hypothèse de perturbation des seuls petits éléments, dans le cas du mélange de billes 800 μ-50 μ.

On remarquera surtout que l'attribution à $\gamma$ de valeurs supérieures à 1 conduit au niveau des valeurs de V à un déplacement du maximum $V_l$ vers les faibles teneurs en éléments fins, ce qui accroît encore la discordance entre les résultats théoriques et observés.

La valeur de $\gamma$ a été calculée dans ce domaine en écrivant que la valeur expérimentale de $b$ pour le mélange s'écartant de la loi d'interaction simple ($g = 30$ p. 100) était égale à $b_0(1 - \gamma B)$, B représentant le volume réel théorique de gros éléments déjà calculé pour le même mélange avec la loi d'interaction ; on a alors :

$$\gamma = \frac{b_0 - b}{B b_0}$$

### C. — *Perturbation de l'arrangement des gros éléments*

Nous allons maintenant supposer que l'introduction d'éléments fins dans un massif de particules grossières perturbe l'arrangement de ces dernières et que la quantité B′ d'éléments grossiers, éliminée de ce fait, est proportionnelle à la quantité $b$ d'éléments fins introduits, soit $B' = \Delta b$, où $\Delta$ représente un coefficient de perturbation des gros éléments.

On a alors :

$$B' = B_0 - B = \Delta b$$

La quantité B d'éléments grossiers restante dans le mélange obéit alors à la relation :

$$B = B_0 - \Delta b$$

Le volume solide total encombrant le volume unitaire est donné par la relation :

$$V = B + b,$$

soit :

$$V = B_0 - \Delta b + b,$$

ce qui peut s'écrire :

$$V = B_0 + b(1 - \Delta) \qquad (3')$$

Comme avec le coefficient $\gamma$, il est alors possible de rendre compte d'un ensemble de situations allant du compactage au foisonnement.
Pour $\Delta = 0$, on retrouve la relation $V = B_0 + b$ ;

pour $\Delta = \frac{B_0}{b_0}$, on rejoint l'expression de V donnée par la loi d'interaction.

Quand le système atteint son maximum de compacité (point A, fig. 6), il y a égalité entre les valeurs de V obtenues par les relations (3') et (2). On peut alors écrire :

$$V_{l\Delta} = B_0 + b(1 - \Delta) = B + b_0(1 - B)$$

En remarquant que $B = B_0 - \Delta b$, on obtient pour $b$ la relation suivante :

$$b = \frac{b_0(1 - B_0)}{1 - b_{0\Delta}}$$

Après simplification, l'expression de $V_{l\Delta}$ devient alors :

$$V_{l\Delta} = \frac{B_0(1 - b_0) + b_0(1 - \Delta)}{1 - b_0}$$

Au-delà de cette valeur de V, nous retrouvons l'expression donnée par la loi d'interaction $V = B + b_0(1 - B)$. Le domaine d'application de la relation (3') dépend de la valeur prise par $\Delta$.

Sur le graphique 5 déjà présenté, on peut constater que la prévision de V avec l'hypothèse de la seule perturbation de l'arrangement des éléments grossiers est plus satisfaisante que la précédente ; en particulier, la teneur en particules fines, au maximum $V_{l\Delta}$, est proche de la teneur obtenue expérimentalement pour la compacité maximale du mélange 800 $\mu$-50 $\mu$.

La valeur de $\Delta$ a été calculée dans cet exemple selon le même principe que pour les valeurs de $\gamma$. On écrit que la valeur expérimentale de B, choisie dans le domaine interessé est égale à $B_0 - B'$.

Avec la valeur de B' obtenue, on calcule :

$$\Delta = \frac{B_0 - B'}{b}$$

Dans cette expression, $b$ est le volume réel de particules fines calculé avec la loi d'interaction pour le mélange correspondant.

### D. — *Double perturbation*

Pour rendre compte maintenant d'une perturbation affectant l'un et l'autre constituant, il convient de rechercher la relation existant entre $\gamma$ et $\Delta$.

Pour une même courbe générale de variation de V représentée par les relations (2') et (3'), le point de compacité maximale est commun ; on peut alors calculer les valeurs de $\Delta$ et de $\gamma$ qui vérifient l'égalité :

$$V_{l\Delta} = V_{l\gamma}$$

soit :

$$B_0 + b(1 - \Delta) = B + b_0(1 - \gamma B)$$

Après simplification, on obtient les relations suivantes :

$$\gamma = \frac{b_0 - b}{b_0(B_0 - \Delta b)}$$

relation où $\gamma$ dépend linéairement de $b$ et varie hyperboliquement en fonction de $\Delta$.

Nous pouvons donc maintenant, à l'aide des relations (2′) et (3′) et de la relation établie entre $\gamma$ et $\Delta$, représenter l'ensemble des cas possibles et dans le domaine de variation de V que nous étudions.

Nous avons illustré avec la figure 6 quelques cas théoriques de variation de V, en ayant d'une part supposé $V_l$ constant (les valeurs du pourcentage pondéral en particules fines déterminant l'abscisse du maximum), d'autre part $V_l$ variant sur

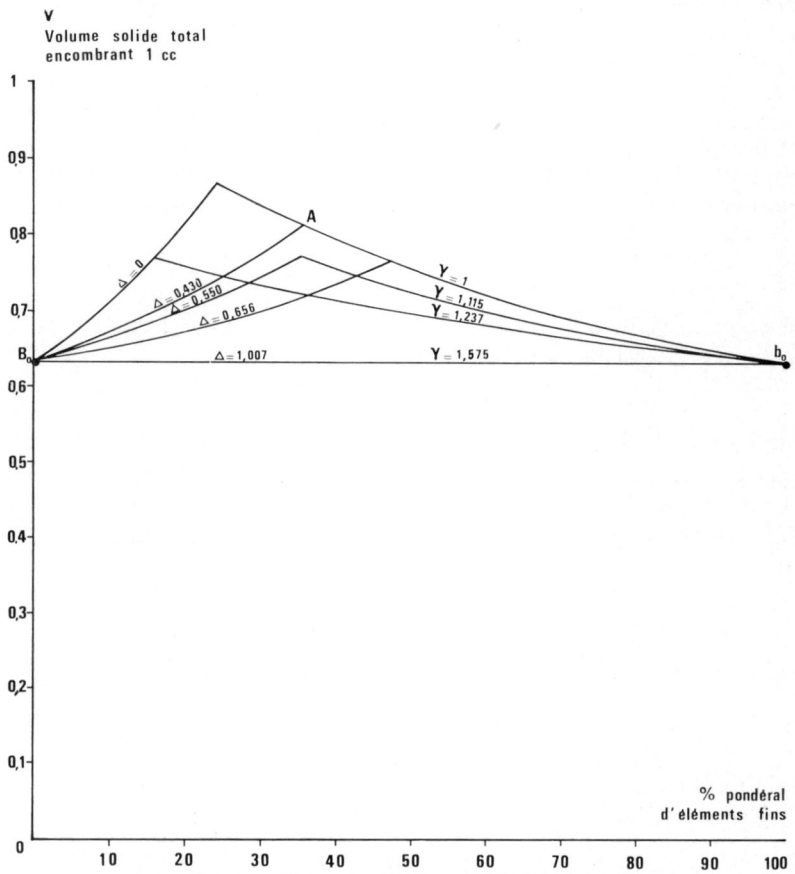



FIG. 6. — *Exemples théoriques de variations de V obtenues avec différentes valeurs des coefficients de perturbation* $\Delta$ *et* $\gamma$

une parallèle à l'axe des ordonnées (le pourcentage en particules fines restant constant). Il convient de remarquer qu'avec les hypothèses utilisées, il est possible de rendre compte d'une perturbation qui affecte *successivement* les gros éléments, puis les éléments fins, en considérant un mélange à proportion croissante de petites particules.

Or, si l'examen des résultats présentés sur la figure 4, montre bien que la variation réelle de B est du type de celle prise en compte dans nos hypothèses, il n'en est pas entièrement de même pour la variation de $b$, qui, pour une part, montre qu'il y a à la fois perturbation de l'arrangement des éléments fins et grossiers.

Au niveau des variations observées de V, cette discordance fondamentale se traduit par le fait que les relations théoriques ne sauraient rendre compte, dans le domaine de compacité maximale, de la courbure toujours présentée par les courbes établies expérimentalement.

Aussi, allons-nous chercher à généraliser le modèle théorique de mélange en tenant compte des données que nous venons de présenter. Cette démarche nous a conduits à envisager une perturbation conjointe de l'arrangement des éléments mis en présence par mélange et à rechercher une représentation continue des variations de V.

## IV. — MODÈLE THÉORIQUE CONTINU

Revenons à l'expression générale concernant les mélanges sans interaction et avec interaction. Rappelons que dans le premier cas la quantité totale de particules solides qui existe dans le volume unitaire est définie par la relation (1) :

$$V' = B \frac{B_0 - b_0}{B_0} + b_0$$

et dans le second cas, où il y a substitution d'un volume apparent de petits éléments à un volume réel égal d'éléments grossiers, par la relation (2) :

$$V = B + b_0(1 - B)$$

La quantité V de particules qui existe dans le volume unitaire est évidemment plus grande que la quantité V′ existant sans interaction. Il est alors possible de définir la relation liée à l'interaction seule, existant entre B, $B_0$, $b_0$ et la quantité de volume solide. Cette dernière, que nous appellerons I, est en effet égale à :

$$I = V - V'$$

soit

$$I = B + b_0(1 - B) - B \frac{B_0 - b_0}{B_0} + b_0$$

et après simplification :

$$I = B b_0 \frac{1 - B_0}{B_0}$$

On peut alors définir V comme la somme des volumes réels correspondant d'une part, à la seule juxtaposition, d'autre part, à la seule interaction :

$$V = V' + I = B \frac{(B_0 - b_0) + b_0 B_0 + B b_0(1 - B_0)}{B_0} \qquad (4)$$

Une telle relation ne concerne que les fonctions linéaires correspondant à la substitution des gros éléments à des petits. En effet, on ne peut étendre cette équation logiquement à des valeurs de B telles que $B > B_0$.

Par contre, si le mélange d'éléments fins aux éléments grossiers provoque un foisonnement de ceux-ci, alors B ne peut être égal à $B_0$ que dans la mesure où tous les éléments fins sont exclus du mélange.

Par conséquent, l'ensemble des états du système pourrait être défini d'après la valeur de B.

La généralisation de l'équation précédente à de telles conditions ne présente pas un grand intérêt puisque de toute façon il faudrait écrire deux relations, l'une correspondant à la substitution des éléments grossiers aux fins, voisine de l'équation que nous venons d'établir, et celle décrivant le mélange d'éléments fins aux éléments grossiers.

Par contre, cette remarque prend tout son intérêt si nous nous référons à un modèle où il y a variation des effets de remplissage ou de substitution d'une manière continue en fonction de la quantité d'éléments grossiers introduits.

Ceci revient à remplacer le terme d'interaction

$$B b_0 \frac{1 - B_0}{B_0}$$

par une nouvelle expression qui rend compte à la fois de la perturbation possible de l'arrangement des petits éléments d'une part, des éléments grossiers d'autre part.

Nous avons précédemment défini la quantité I comme représentant le volume réel de particules qui correspond à la seule interaction. Considérons un volume unitaire rempli par $b_0$. Quand nous introduisons un volume réel B de gros éléments, le volume réel I alors atteint est une fonction croissante de la quantité relative B introduite, soit :

$$I = U \cdot \frac{B}{B_0}$$

Pour rendre compte d'un effet de perturbation, les valeurs de U seront telles que :

$$0 \leqslant U \leqslant b_0(1 - B_0)$$

Mais le coefficient U n'est qu'un terme constant, dont la valeur pour un mélange de deux populations données rend compte d'une interaction totale ou d'une perturbation liée au dérangement des petits éléments quand on introduit les gros.

Il nous faut également tenir compte du fait que l'introduction de gros éléments peut perturber l'arrangement des gros éléments déjà présents et qu'à la limite, l'introduction de B dans un massif contenant $B_0$ de gros éléments n'entraîne pas l'apparition d'un volume réel supplémentaire, I étant alors nul.

On peut rendre compte d'un tel mécanisme en écrivant que I est proportionnel au volume apparent non occupé par les gros éléments présents dans le mélange, soit :

$$1 - \frac{B}{B_0}$$

On a alors :

$$I = U \cdot \frac{B}{B_0} \cdot \left(1 - \frac{B}{B_0}\right)$$

Dans cette relation, où I est nul quand $B = B_0$, on peut exprimer l'importance de la perturbation de l'arrangement des gros éléments en remplaçant l'expression $\frac{B}{B_0}$ par $\left(\frac{B}{B_0}\right)^n$.

Pour $n$ petit, la perturbation interviendra dès l'introduction d'une petite quantité de gros éléments. Pour des valeurs de $n$ élevées, la perturbation n'interviendra que pour des teneurs importantes en éléments grossiers. La quantité I est définie par la relation :

$$I = U \cdot \frac{B}{B_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^n\right]$$

qui portee dans la relation (4) aboutit à l'équation suivante, définissant les variations de V dans l'ensemble du système :

$$V = \frac{B(B_0 - b_0) + b_0B_0 + UB\left[1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^n\right]}{B_0} \qquad (5)$$

La porosité totale se définit alors de la façon suivante :

$$P_0 = 1 - \frac{B(B_0 - b_0) + b_0B_0 + UB\left[1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^n\right]}{B_0}$$

La fonction proposée :

$$V = \frac{B\,(B_0 - b_0) + b_0B_0}{B_0} + U\,\frac{B}{B_0}\left[1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^n\right]$$

comprend en définitive deux termes représentant respectivement la loi d'additivité et une loi d'interaction.

Ce dernier terme :

$$I = U\,\frac{B}{B_0}\left[1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^n\right]$$

— s'annule lorsque $n = 0$ ou lorsque $U = 0$. Le mélange est alors défini par la seule loi d'additivité ;

— est maximum lorsque $n$ tend vers l'infini
et lorsque simultanément U tend vers $b_0(1 - B_0)$

$$I = \frac{Bb_0}{B_0}(1 - B_0)$$

La fonction définissant V est alors de la forme :

$$V = \frac{B(B_0 - b_0) + b_0B_0 + Bb_0(1 - B_0)}{B_0}$$

et en simplifiant :

$$V = B + b_0(1 - B)$$

Nous retrouvons la relation (2) définissant la loi d'interaction maximale dans le domaine des substitutions auquel est appliqué le coefficient U. Nous considérerons donc que $n$ peut théoriquement varier de 0 à $+\infty$, et U de 0 à $b_0(1 - B_0)$, si l'on admet que les limites inférieures et supérieures de V pour une valeur donnée de B sont respectivement celles correspondant à la loi d'additivité et à la loi d'interaction sans perturbation.

Si nous revenons maintenant à la loi continue proposée, nous constatons qu'elle a la forme générale d'un polynôme en $\frac{B}{B_0}$ de degré $n + 1$.

$$V = b_0 + (B_0 - b_0 + U)\frac{B}{B_0} - U\left(\frac{B}{B_0}\right)^{(n+1)}$$

Sa dérivée $v'$ par rapport à $\frac{B}{B_0}$ :

$$v' = B_0 - b_0 + U - U(n + 1)\left(\frac{B}{B_0}\right)^n$$

s'annule pour

$$\left(\frac{B}{B_0}\right)^n = \frac{B_0 - b_0 + U}{U(n + 1)}$$

correspondant au minimum de porosité.

Aux limites de U et de $n$, il n'existe pas de solution déterminée lorsque U et $n \to 0$ (loi linéaire d'additivité) et $B \to B_0$ dans le cas de l'interaction sans perturbation.

*Détermination de U et de n.*

Les valeurs numériques de U et de $n$, caractéristiques de la loi de mélange de deux classes données de particules, peuvent être théoriquement calculées en écrivant que la fonction (5) passe par deux points expérimentaux d'ordonnées $V_1$ et $V_2$ et d'abscisses $B_1$ et $B_2$, dans un système de coordonnées exprimant V et B sous forme de fractions d'un volume apparent unitaire.

Toutefois, le système de deux équations à deux inconnues, U et $n$, ne peut être résolu que par une méthode très laborieuse.

Aussi avons-nous utilisé le fait que lorsque $B_0$ est égal ou tout au moins peu différent de $b_0$, la valeur maximale de V correspond à la valeur maximale du terme interaction I.

La dérivée de ce dernier par rapport à $B/B_0$

$$\frac{dI}{dB} = U\left[1 - (n + 1)\left(\frac{B}{B_0}\right)^n\right]$$

s'annule pour une valeur de B indépendante de U. Il est donc possible d'obtenir la valeur de $n$ en annulant l'expression

$$1 - (n + 1)\left(\frac{B}{B_0}\right)^n$$

dans laquelle $\frac{B}{B_0}$ prend la valeur correspondant à l'abscisse du maximum expérimental.

$n$ est alors obtenu à l'intersection des courbes représentatives des deux fonctions

$$y_1 = \frac{1}{n + 1}$$

$$y_2 = \left(\frac{B}{B_0}\right)^n$$

ou encore après transformation logarithmique

$$\log y_1 = -\log (n + 1)$$

$$\log y_2 = n \log \left(\frac{B}{B_0}\right)$$

Les valeurs de $n$ ainsi déterminées sont portées dans l'expression du volume de solide V au maximum expérimental. Le paramètre U est alors calculable numériquement à partir de la relation

$$U = \frac{VB_0 - b_0B_0 - (B_0 - b_0)}{B\,[1 - (B/B_0)^n]}\,B$$

dans laquelle V, B et $n$ sont connus.

*Application à des mélanges de billes de verre effectués à sec.*

Nous avons d'abord appliqué ce mode de calcul au cas des mélanges de deux populations de billes de verre pour lesquels, en règle générale, $B_0$ est très peu différent de $b_0$. L'hypothèse de base : coïncidence entre le maximum de V et le maximum du terme interaction, est alors vérifiée avec une très bonne approximation.

Le tableau I rassemble les résultats obtenus.

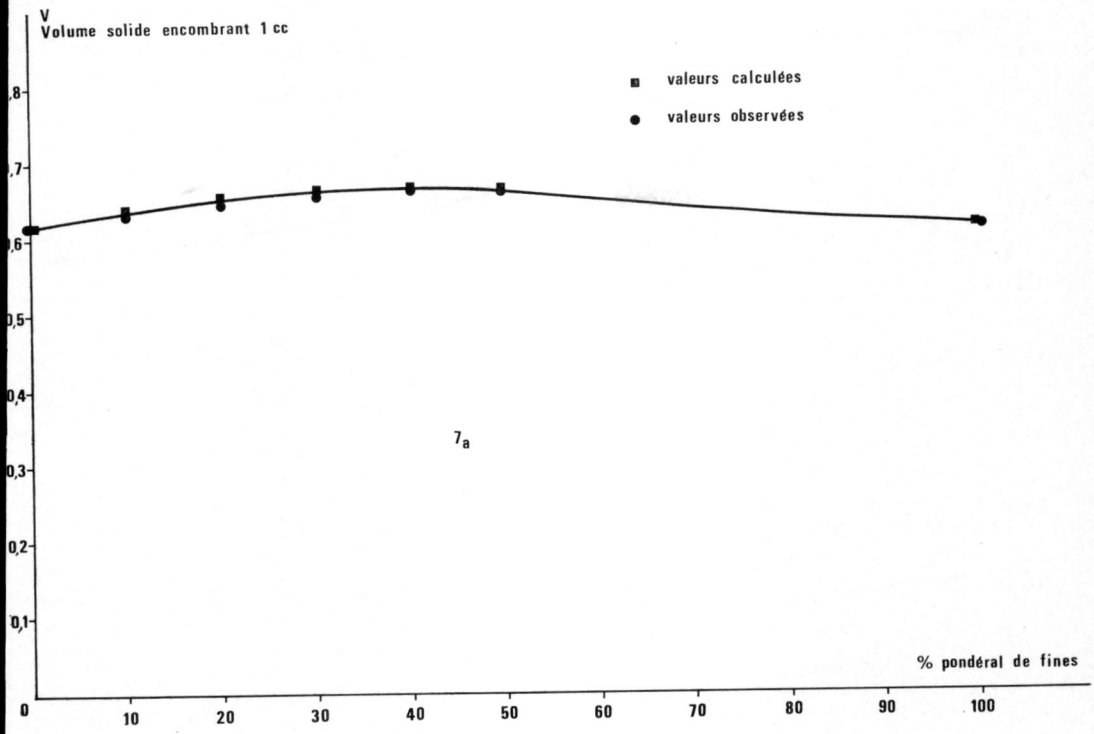
TABLEAU I

| Mélanges de billes étudiés | $B_0 - b_0$ | $n$ | U | U à la limite $b_0(1 - B_0)$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 000 μ + 400 μ | 0,006 | 2,8 | 0,107 | 0,233 |
| 400 μ + 50 μ | 0,001 | 6,3 | 0,167 | 0,232 |
| 800 μ + 50 μ | 0,003 | 10,5 | 0,187 | 0,231 |
| 1 000 μ + 50 μ | — 0,011 | 20,7 | 0,203 | 0,240 |

A partir de ces données, nous avons tracé les courbes théoriques de variation du volume solide V en fonction de la teneur pondérale du mélange en particules grossières et nous les avons comparées aux variations expérimentales (fig. 7 *a*, *b*, *c*, *d*).

On constate que, dans l'ensemble, les résultats concordent de façon très satisfaisante. En valeur absolue, les écarts de volume solide et donc de porosité par unité de volume apparent sont souvent inférieurs à 1 p. 100 et toujours inférieurs à 2 p. 100. Si l'on considère que les variations expliquées de porosité dépassent 15 p. 100 en valeur absolue, on peut conclure que le modèle proposé exprime valablement les variations de porosité de mélanges — en proportions variables — de deux classes de particules sphériques.

On peut alors tenter de vérifier la signification générale du modèle et de préciser le sens des paramètres U et $n$ à partir de la comparaison des divers types de mélanges étudiés.



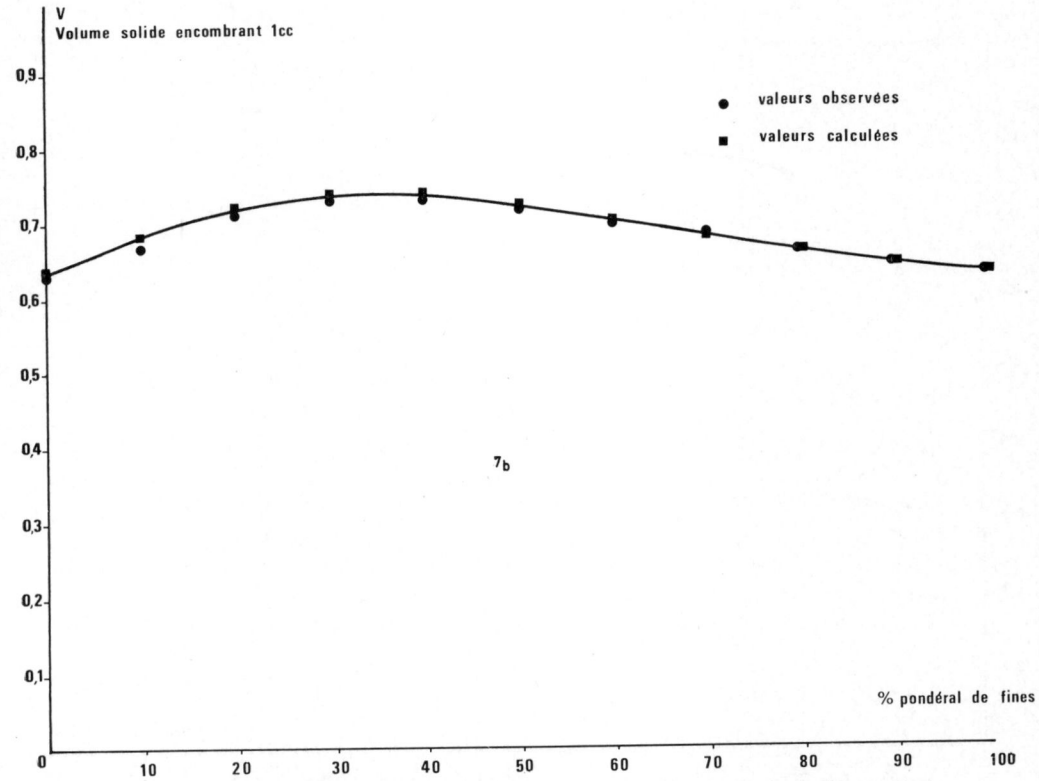




FIG. 7. — *Comparaison des variations de V théoriques* (calculées d'après le modèle continu) *et expérimentales* (obtenues avec des mélanges de billes de verre)

*a* : billes 1 000 μ — 400 μ  *b* : billes 400 μ — 50 μ

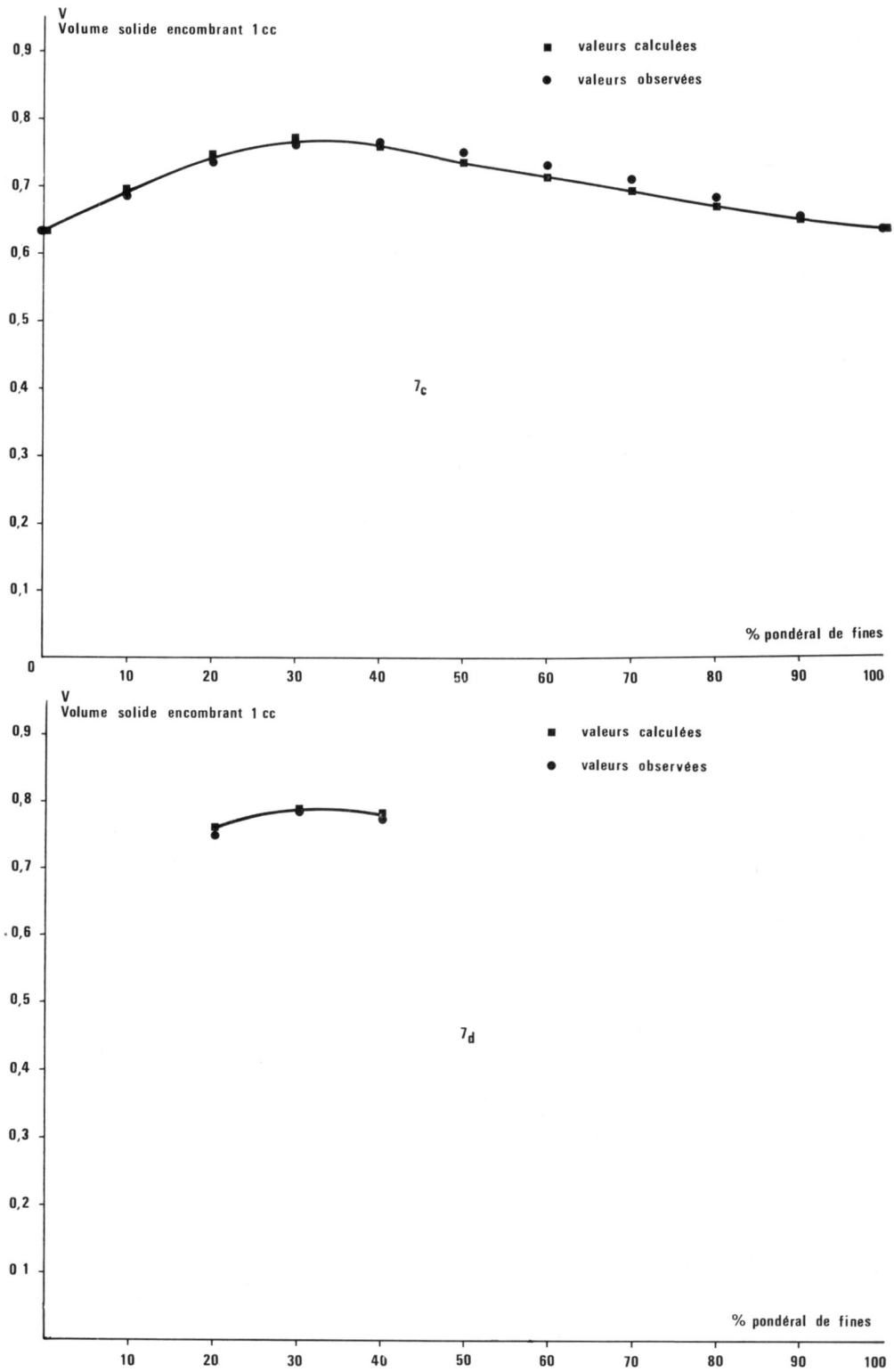



FIG. 7. — *Comparaison des variations de V théoriques* (calculées d'après le modèle continu) *et expérimentales* (obtenues avec des mélanges de billes de verre)
*c* : billes 800 μ — 50 μ *d* : billes 1 000 μ — 50 μ

Globalement, on constate que le terme « interaction »

$$I = U \frac{B}{B_0} \left[ 1 - \left( \frac{B}{B_0} \right)^n \right]$$

qui croît avec U et $n$, apparaît lié au rapport $\frac{\varnothing\ B}{\varnothing\ b}$ des diamètres moyens des deux classes de particules associées. Les figures 8 *a* et 8 *b* présentent les variations de I maximum (*a*) et celles du pourcentage pondéral correspondant de grosses particules (*b*) en fonction de ce rapport. Pour $\frac{\varnothing\ B}{\varnothing\ b} = 1$, $I = 0$ et comme il s'agit d'un mélange virtuel de classes identiques de particules, on peut admettre pour des raisons de

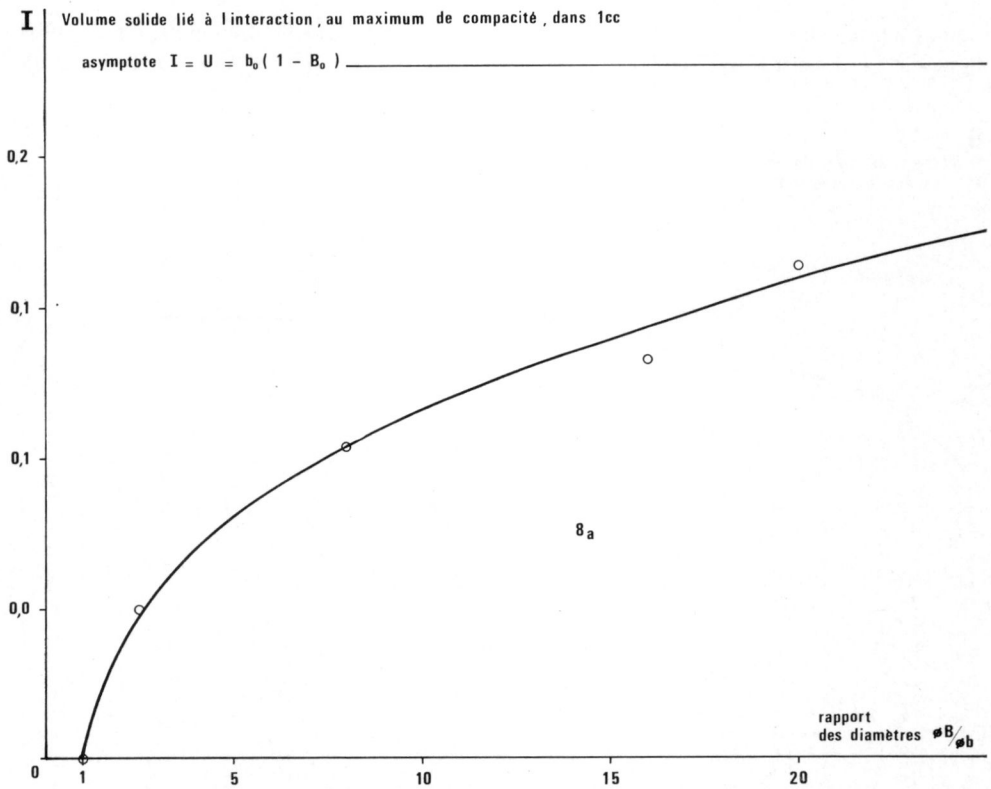



FIG. 8 *a*. — *Variation du volume solide I lié à la seule interaction, en fonction du rapport des diamètres des classes de particules en présence, dans les mélanges au maximum de compacité.*

symétrie que le pourcentage pondéral de particules « grossières » soit égal à 50. Lorsque le rapport $\frac{\varnothing\ B}{\varnothing\ b}$ tend vers l'infini, il est raisonnable de penser que la loi qui régit le mélange est celle que nous avons appelée loi d'interaction simple. La valeur de I correspondant au mélange le plus compact tendrait alors vers $V_l - B_0$ (cf. p. 625), soit, en tenant compte de l'approximation $B_0 = b_0 = \beta_0$ :

$$I \to \beta_0(1 - \beta_0) = U$$

Dans l'intervalle, au fur et à mesure que le rapport des diamètres caractéristiques des deux classes croît, le maximum de compacité (observé ou calculé) augmente et il est atteint pour des proportions croissantes de particules grossières.

L'interprétation physique de cette influence du rapport $\frac{\varnothing\ B}{\varnothing\ b}$ est en partie suggérée par l'examen des variations observées de U et de $n$ en fonction de ce rapport (fig. 9) et de l'influence propre que leur place dans le modèle mathématique confère à ces paramètres.

On constate que U et $n$ augmentent avec le rapport $\frac{\varnothing\ B}{\varnothing\ b}$. Comme pour les valeurs élevées de $n$, le terme $\left(\frac{B}{B_0}\right)^n$ intéresse surtout le domaine des compositions du mélange dans lequel des particules fines viennent occuper la porosité ménagée par les plus grossières, il est admissible qu'en *l'absence de toute interaction physique* entre les deux

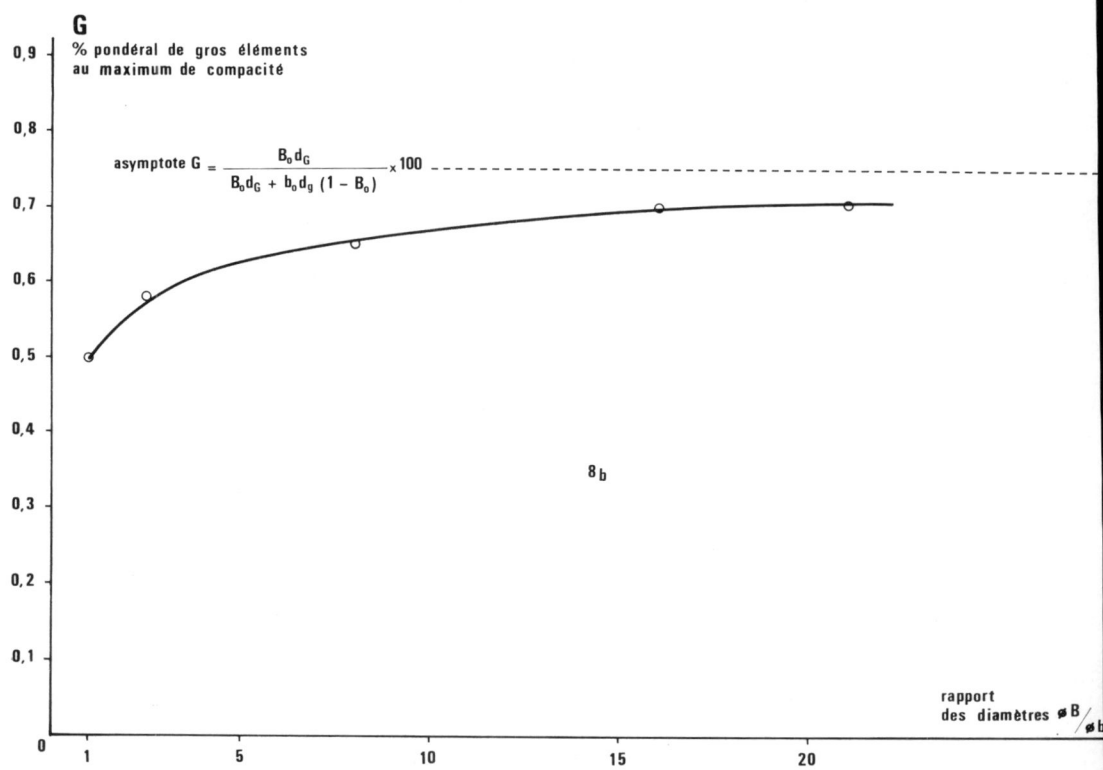



FIG. 8 *b*. — *Variation de la teneur pondérale en gros éléments au maximum de compacité observé, en fonction du rapport des diamètres des classes de particules en présence.*

classes de particules, le remplissage de la porosité 1 — B soit d'autant plus complet, d'autant moins perturbateur, et donc acquis pour des teneurs en particules fines d'autant plus faibles (pour une valeur de $B_0 = b_0$ donnée) que le rapport des diamètres est plus élevé.

*Cas d'une série de mélanges de billes de verre de 2 mm et de limons de* 20-50 μ.

Cette série représente un cas extrême de la gamme des mélanges de billes précédents. Elle a été étudiée pour estimer les possibilités d'extrapolation des variations de U, de *n* et du terme « interaction » à partir des éléments de courbes figurant au graphique 9.

Le rapport $\frac{\varnothing\ B}{\varnothing\ b}$ est, en effet, voisin de 100 pour cette série, le diamètre équivalent du limon 20-50 μ utilisé se situant peu au-dessus de 20 μ.

Ces mélanges n'ont pu être réalisés à sec, les particules fines s'écoulant à travers le massif des plus grossières comme à travers un tamis. Aussi, les avons-nous effectués en présence d'acide oléique dont la viscosité élevée (25,6 cPo à 30°C) permet de réduire cette tendance à la séparation.

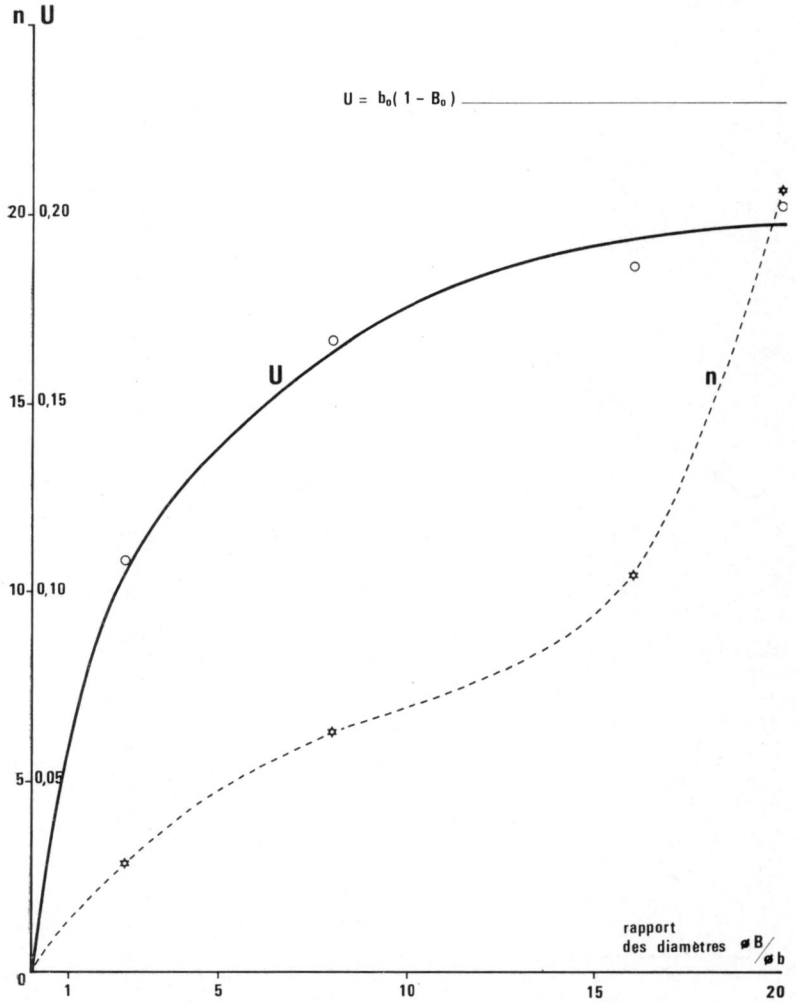



FIG. 9. — *Variations observées des paramètres n et U du modèle théorique continu en fonction du rapport des diamètres des classes de particules en présence*

On incorpore des quantités croissantes de billes de 2 mm à une pâte de limon et d'acide oléique dont la composition volumique est la suivante :

limon 20-50 $\mu$ = 49,4 p. 100 = $b_0$
acide oléique = 49,15 p. 100
air = 1,45 p. 100

Les valeurs observées de volume solide encombrant 1 cm³ de mélange sont indiquées à la figure 10. On constate que pour les teneurs pondérales en limon telles que 100 $\geqslant$ L, p. 100 $\geqslant$ 30, les valeurs observées correspondent étroitement à celles calculées par la loi d'interaction simple, c'est-à-dire en supposant $n$ infiniment grand et $U = b_0(1 - B_0)$.

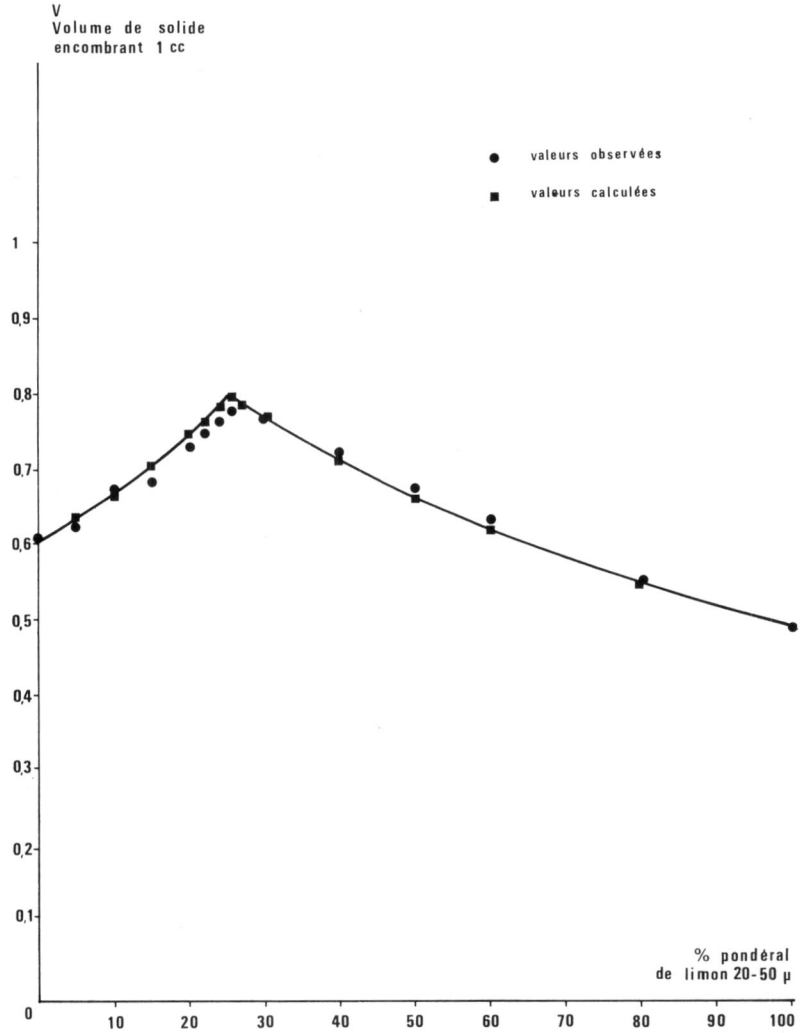



FIG. 10. — *Vérification de la loi d'interaction simple dans le cas d'un mélange de particules à rapport de diamètres élevé* (billes 2 000 $\mu$ ; limon 20 $\mu$-50 $\mu$) *ne présentant pas d'organisation marquée des petits éléments*

Pour les teneurs en limon inférieures à 30 p. 100, l'accord avec la loi de remplissage ($V = B_0 + b$) bien qu'encore très satisfaisant est un peu moins bon. Les conditions de préparation ayant dû être, pour des raisons techniques, légèrement modifiées dans un sens entraînant une variation de $b_0$.

Il reste que se trouve vérifiée la loi empirique reliant U et $n$ d'une part, $\frac{\varnothing B}{\varnothing b}$ d'autre part, dans le cas où les interactions physiques et physicochimiques entre les constituants du mélange sont négligeables.

*Application à des matériaux terreux.*

Il s'agit d'échantillons artificiels constitués par des mélanges binaires d'argile et de limon effectués dans des conditions standard.

La procédure est celle qui a été proposée par KHEYRABI et MONNIER (1968) et utilisée par FIÈS (1970).

Rappelons qu'elle comporte le malaxage à une humidité convenable des deux classes de particules (dans les proportions choisies), le ressuyage sur Büchner de la pâte ainsi obtenue, suivi d'un séchage à l'étuve à 105°C. La porosité du matériau est calculée à partir de la densité réelle du mélange et de sa densité apparente mesurée par la méthode du vernis, soit sur l'échantillon sec, soit sur l'échantillon saturé en eau par humectation sous vide à partir d'une plaque poreuse pour limiter les risques d'apparition d'une porosité « structurale » de fissures.

Nous examinerons ici deux exemples :

— une série de mélanges associant des proportions croissantes d'une argile de sol à du limon 2-50 μ (série AL),

— une série de mélanges homologues constitués d'une kaolinite de gisement et d'un limon 2-20 μ (série K*l*).

La première série a été étudiée à l'état sec, la seconde à saturation, c'est-à-dire après gonflement.

Les valeurs de $B_0$ (limon) et $b_0$ (argile humide ou sèche) correspondant aux différents constituants sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| Argile extraite d'un sous-sol limoneux (A) (état sec 105°) .. | $b_{01} = 0{,}593$ |
| Limon 2-50 μ (L) ..... | $B_{01} = 0{,}570$ |
| Kaolinite K saturée en eau ..... | $b_{02} = 0{,}400$ |
| Limon 2-20 μ (*l*) ..... | $B_{02} = 0{,}530$ |

Les valeurs de $B_0$ et $b_0$ ont été déterminées sur des massifs de chacun des 4 constituants pris à l'état pur mais ayant subi une préparation correspondant à celle du mélange dans lequel ils doivent être introduits.

*Détermination des paramètres U et n.*

Les valeurs de $B_0$ et $b_0$ correspondant à une série de mélanges donnés peuvent être ici différentes l'une de l'autre ; cela est particulièrement net pour la série K*l* à saturation et le sera dans tous les cas où l'on s'intéresse à la porosité de mélanges d'argile humide et d'un squelette quelconque. Nous avons cependant admis que le maximum de compacité coïncidait approximativement avec le maximum du terme

« interaction ». Cette approximation, qui rend possible la suite des calculs, implique *a priori* que le paramètre U — qui a les dimensions d'un volume = corrige dans une certaine mesure la différence $B_0 - b_0$. Elle est justifiée par l'examen des courbes expérimentales.

Sur ces bases, les valeurs de U et de $n$ calculées comme précédemment à partir des coordonnées observées du maximum expérimental de compacité, figurent dans le tableau ci-dessous :

| Mélanges étudiés..... | $B_0 - b_0$ | $n$ | U | $b_0(1 - B_0)$ |
|---|---|---|---|---|
| Série AL (sec) ..... | — 0,023 | 2,1 | 0,19 | 0,255 |
| Série K*l* (saturation) .... | 0,130 | 8,1 | 0,115 | 0,188 |

Les figures 11 *a* et *b* permettent de comparer, sur ces deux exemples, les courbes théoriques et expérimentales représentatives des variations de porosité.

Bien que l'accord soit moins satisfaisant que dans le cas des mélanges de billes les différences ne dépassent pas 2 p. 100 à 3 p. 100 de porosité. Les écarts les plus notables entre valeurs observées et mesurées se situent, par ailleurs, dans la gamme des mélanges correspondant à la phase de « remplissage », pour laquelle le terme interaction dépend essentiellement de U. Ce dernier, calculé selon l'hypothèse $B_0 = b_0$, se trouve sous-estimé dans la série AL et surestimé dans la série K*l*.

En ce qui concerne l'interprétation physique de la perturbation, on peut noter que, bien que dans les deux exemples retenus, ∅ B soit très élevé, ce rapport ne détermine plus, comme dans le cas du mélange de billes, les valeurs de U et de $n$. C'est seulement en se référant aux schémas d'arrangement élémentaire, tirés par FIÈS de l'étude de la porosité matricielle de mélanges binaires, que l'on peut ici estimer le mécanisme de la perturbation.

1. *Dans le cas des mélanges Kl étudiés à l'état humide,* le terme $\left(\frac{B}{B_0}\right)^n$ est négligeable tout au long de la phase de substitution. Le terme interaction y est alors de la forme $I = U\frac{B}{B_0}$, avec U faible. Cela signifie que la perturbation liée au remplacement de la pâte argileuse par des particules grossières est importante : en d'autres termes, l'introduction de ces particules provoque une réorganisation de la pâte argileuse telle que la porosité totale soit augmentée de façon proportionnelle à B. Ceci peut être rapproché de la constatation faite par FIÈS que dans le cas de mélanges à base de kaolinite, même humide, on n'observe de phase argileuse continue que pour des matériaux constitués d'argile presque pure.

Notons que, dans ce cas, l'influence de U peut être rapprochée de celle du paramètre $\gamma$, introduit page 630, pour traduire les effets de perturbation de l'arrangement des éléments fins. Cette comparaison peut porter sur la forme même des modèles correspondants.

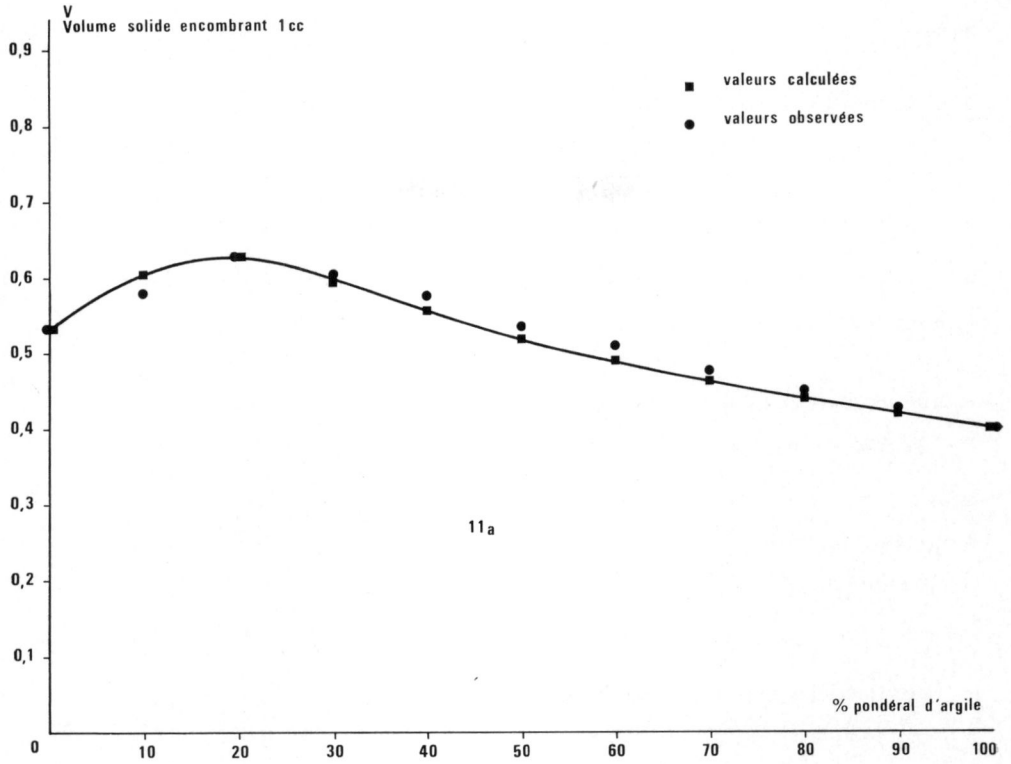
---

FIG. 11. — *Exemple de prévision de V à l'aide d'un modèle théorique continu dans le cas de matériaux terreux*

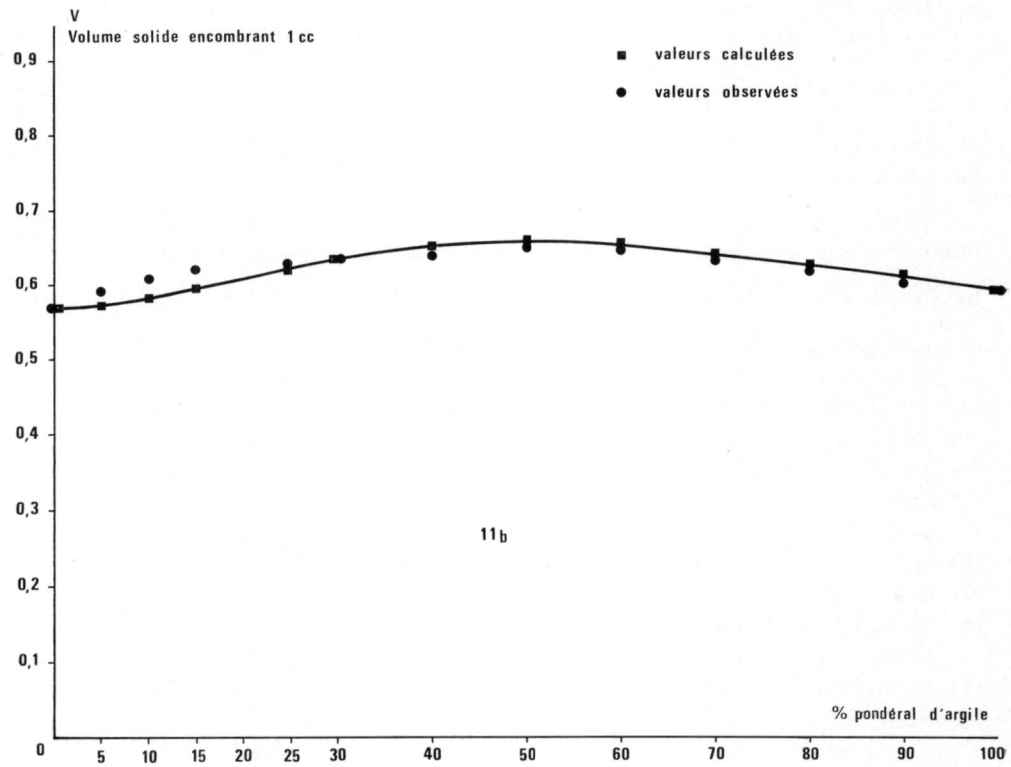
La fraction argileuse s'est en partie organisée autour des éléments du squelette, au cours d'une phase de dessiccation postérieure au mélange des constituants.

*a*) Échantillons préparés par mélange d'une pâte d'argile extraite d'un sol et d'un limon 2 μ-50 μ, puis séchés.

*b*) Échantillons préparés par mélange d'une pâte de kaolinite et de limon 2 μ-20 μ, séchés puis saturés en eau.


V
Volume solide encombrant 1 cc
valeurs calculées
valeurs observées
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
% pondéral d'argile

11a


V
Volume solide encombrant 1 cc
valeurs calculées
valeurs observées
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
5
10
15
20
25
30
40
50
60
70
80
90
100
% pondéral d'argile

11b

Rappelons qu'avec un terme $\left(\frac{B}{B_0}\right)^n$ négligeable, le volume V est ici :

$$V = \frac{B\,(B_0 - b_0) + b_0 B_0}{B_0} + U\,\frac{B}{B_0}$$

qui peut être mis sous la forme

$$V = B + b_0\left(1 - \frac{b_0 - U}{B_0\, b_0}\,B\right)$$

comparable avec l'équation 2′ (p. 630) :

$$V = B + b_0(1 - \gamma B)$$

valable dans le domaine des substitutions.

Les deux expressions de V sont identiques

pour $$\gamma = \frac{b_0 - U}{b_0 B_0}$$

Avec cette condition,

— lorsque $U \to 0$,

$$\gamma \to \frac{1}{B_0},$$

les deux modèles expriment la loi de non interaction ;

— lorsque $U \to b_0(1 - B_0)$,

$$\gamma \to 1,$$

les deux modèles expriment la loi d'interaction simple sans perturbation ;

— pour $0 < U < b_0(1 - B_0)$,

$$1 < \gamma < \frac{1}{B_0},$$

les deux modèles expriment la même perturbation des éléments fins dans le domaine des substitutions.

2. *Dans le cas de la série AL étudiée à l'état sec,* le paramètre U n'est que peu inférieur à la valeur limite $b_0(1 - B_0)$, ici égale à 0,25. Comme $n$ est faible, la perturbation liée au terme $I - \left(\frac{B}{B_0}\right)^n$ est perceptible tout au long de la courbe, bien que plus marquée pour les valeurs de B proches de $B_0$.

A cet égard, l'interprétation de U et de $n$, c'est-à-dire la recherche d'une relation éventuelle avec les caractéristiques du mélange, est tout aussi impossible que dans le cas précédent. Seul, l'effet global de perturbation qu'ils expriment peut être rapproché des mêmes observations de FIÈS sur l'organisation de l'argile autour des éléments du squelette.

Dans les deux exemples étudiés ici, les conditions de préparation des échantillons, à savoir un ressuyage et un séchage à 105°C, suivis ou non d'une réhumectation sous vide à saturation, semblent donc jouer un rôle déterminant en favorisant un arrangement élémentaire « organisé ».

Ce fait est confirmé, *a contrario,* par l'étude de mélanges dans lesquels on a volontairement cherché à limiter la mise en place de l'argile autour des éléments du squelette.

Dans ce but, les mesures de volume apparent à l'état humide ont été pratiquées aussitôt après le malaxage, les manipulations étant effectuées en atmosphère saturée en vapeur d'eau pour éviter toute évaporation. Ce type de préparation a porté sur une série de mélanges associant à une pâte d'argile de sol A, à 248 p. 100 d'humidité pondérale correspondant à un $b_0 = 0{,}125$, des proportions croissantes d'un limon quartzeux 2-50 μ.

On peut constater (fig. 12) que tant que les mélanges ont été techniquement réalisables dans de bonnes conditions, c'est-à-dire pour les teneurs en argile ⩾ 20 p. 100 (poids d'argile sèche pour 100 g de mélange sec), l'accord est tout à fait satisfaisant entre les valeurs observées et les valeurs calculées selon la loi d'interaction simple, avec $b_0 = 0{,}125$ et $B_0 = 0{,}54$ (courbe 1).

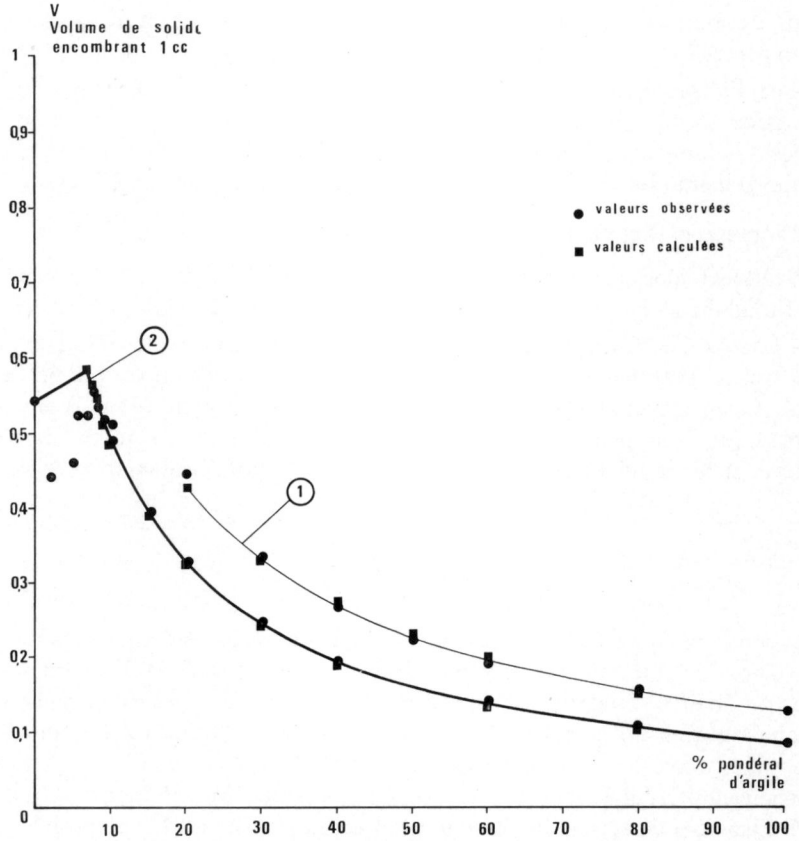



FIG. 12. — *Vérification de la loi d'interaction simple dans le cas de mélanges non séchés d'une pâte argileuse et d'un limon 2 μ-50 μ*

Pour les teneurs en limons supérieures à 80 p. 100, le mélange se fait mal, la quantité d'eau apportée par l'argile devenant insuffisante pour assurer la lubrification. Nous avons alors utilisé une pâte argileuse plus humide (391 p. 100 d'humidité pondérale). La valeur de $b_0$ est dans ces conditions abaissée à 0,085 ; à nouveau les valeurs observées se placent sur la courbe (2) figurant les variations de volume

solide calculées suivant la loi d'interaction correspondant à la nouvelle valeur de $b_0$, et cette fois, l'accord est satisfaisant jusqu'à des teneurs en argile légèrement inférieures à 10 p. 100 ; pour des taux plus faibles encore, on constate à nouveau l'impossibilité de réaliser des mélanges homogènes en raison de l'insuffisance de la quantité d'eau présente. La manipulation peut théoriquement être reprise avec des pâtes argileuses encore plus humides. Toutefois, les valeurs de $b_0$ correspondantes deviennent très faibles et le domaine de remplissage $V = B_0 + b$ devient trop étroit pour que la vérification de la loi d'interaction simple y soit possible de façon précise.

Il reste qu'avec ce mode particulier de préparation ne comportant aucun retrait de la phase argileuse, la loi d'interaction simple se trouve strictement vérifiée dans le domaine de « substitution »[$V = B + b_0(1 - B)$].

L'influence de l' « histoire hydrique » d'un matériau contenant de l'argile sur la loi d'interaction (qui régit la variation de sa porosité en fonction de sa constitution) est donc précisée :

— en l'absence de toute phase de ressuyage et (ou) de séchage, c'est la loi d'interaction simple qui intervient : les particules argileuses se comportent comme des billes de diamètre infiniment petit par rapport à celui des éléments de squelette. Ce comportement observé est une bonne vérification du passage à la limite du modèle général lorsque le rapport $\frac{\varnothing B}{\varnothing b}$ tend vers l'infini ;

U et $n$ tendent alors respectivement vers $b_0(1 - B_0)$ et vers $+ \infty$, le terme interaction I tendant alors vers son maximum correspondant à la loi d'interaction simple ;

— lorsque l'échantillon subit une perte d'eau, il s'ensuit une réorganisation de l'argile, qui persiste même après une réhumectation jusqu'à saturation en eau de la porosité. Cette structuration entraîne une perturbation conduisant à un gain de porosité. L'argile ne peut plus être considérée comme un massif inerte de très fines particules, et la signification de U et de $n$ est, de ce fait, beaucoup plus complexe.

## CONCLUSIONS

Au cours de ce travail, nous avons confronté le résultat de mesures de porosité à des valeurs calculées à partir d'une série de modèles qui explicitaient les conséquences de diverses modalités d'arrangement des particules mises en mélange.

Dans certains cas privilégiés, des lois simples sont applicables : tout se passe comme s'il n'y avait pas d'interaction (additivité) ou comme si l'interaction entre les particules présentes n'entraînait aucune perturbation réciproque (interaction simple). Dans ces deux cas, la porosité d'un mélange binaire de composition donnée peut être calculée à partir des seuls volumes réels $B_0$ et $b_0$ encombrant un volume apparent unitaire, supposés caractéristiques de chacune des deux classes de particules associées. Nous avons montré toutefois qu'il s'agit là de cas limites correspondant, le premier, au mélange de deux classes identiques de particules, le second, au mélange à des particules d'une taille donnée de particules beaucoup plus petites. Leur intérêt essentiel est de fournir des références simples et générales pour l'étude de mélanges dont les caractéristiques sont plus complexes. Ces derniers présentent, en général, des porosités intermédiaires entre ces deux porosités de référence.

Deux cas peuvent alors se présenter :

— Lorsque les deux classes de particules ne sont susceptibles que d'interactions de type mécanique ou stérique (mélanges de particules inertes : billes de verres, sables, limons quartzeux), on peut évaluer la porosité résultant de leur association en faisant intervenir des effets de perturbation dont les paramètres représentatifs dépendent, selon une loi empirique, du rapport des diamètres moyens de chacune des deux classes. Les variations de porosité en fonction de la composition de tels mélanges peuvent être représentées par une famille de courbes correspondant chacune à un rapport de diamètres donnés. Cette conclusion, qui s'appuie sur des mesures directes de porosité, a déjà été proposée par FURNAS (1929) au terme d'une démarche tout à fait différente puisqu'elle procédait de calculs de porosité à partir de mesures de flux gazeux à travers les échantillons étudiés. Cette conséquence est un argument important en faveur de la généralité des résultats que nous avons présentés (FURNAS opérait avec des particules de taille, de forme et de nature très différentes des nôtres) et aussi des possibilités d'applications pratiques qu'ils offrent.

— Pour la plupart des matériaux terreux, une interaction physique ou physico-chimique se manifeste entre les deux types de particules associées : un exemple en est fourni par l'organisation de l'argile autour des éléments du squelette observée par FIÈS (1971) dans le cas d'échantillons séchés ou réhumectés après séchage. La perturbation qui en résulte peut être représentée par les mêmes modèles généraux ; toutefois les paramètres correspondants n'ont pu être rattachés de façon simple aux caractéristiques des deux classes de particules constituant le mélange. Ils ne peuvent donc être obtenus, pour l'instant, qu'à partir de l'ajustement du modèle à des valeurs expérimentales.

S'ils conservent leur pouvoir de description et permettent toujours des comparaisons, il n'est possible de les utiliser pour les prévisions que par intrapolation entre des résultats de mesures. L'interprétation de la porosité texturale de tels matériaux ne pourra s'appuyer sur les modèles proposés que lorsque les paramètres U et $n$, traduisant la perturbation globale par rapport aux porosités de références, pourront être rattachés aux caractéristiques des particules qui influent sur les mécanismes de la perturbation. La poursuite des recherches sur la mise en place de l'arrangement élémentaire, et en particulier sur l'influence des propriétés de gonflement et d'orientation de la phase argileuse, semble susceptible de conduire à de tels résultats.

*Reçu pour publication en août 1972.*

## SUMMARY

STUDY OF SOME LAWS GOVERNING POROSITY OF LOOSE MATERIALS

This is a study of textural porosity understood as the fractional part of soil porosity depending on the sole relative disposition of elementary particles.

Textural porosity values, measured on binary mixtures of various materials have been compared with computed values derived from theoretical models embodying particles arrangement laws.

Two simple laws, built upon the sole initial porosity values of each particles class, account for the extreme variations of textural porosity :

— the « non interaction » law states that the system porosity varies continuously between the limit values of initial porosities,
— the « simple interaction » law states that the system porosity passes through a marked low point with regard to the initial porosity values.

Within the so delimited range, a continuous theoretical model calls upon « disturbance effects » acting upon the constitutive elements arrangement to account for the observed porosity values. Where the interactions between constitutive particles are of a sterical nature only, the disturbance parameters are related, following an empirical law, to the elementary particles size. In the case of earthy materials with a hydrical record, a physical interaction, bound to the way in which clay organizes itself around the skeletal elements, takes the place of the « crowding effect », thereby rendering the interpretation of disturbance parameters rather difficult.

## ZUSAMMENFASSUNG


### UNTERSUCHUNG EINZELNER DIE POROSITÄT VON SCHÜTTSTOFFEN BESTIMMENDER GESETZMÄSSIFKEITEN

Diese Arbeit betrifft die texturale Porosität welche ein Teil der Gesamtporosität ist und nur von der einzigen relativen Einrichtung der anwesenden Elementarteilchen abhängt.

Auf binären Mischungen von verschieden Materialen erlangene Messungen dieser Porosität sind mit gerechneten Werten gegenübergestellt. Diese Werte sind ab theoretischen Modellen, die Ordnenregel zwischen Elementarteilchen ausdrücken, eingeführt.

Zwei einfache Gesetze legen über die äussersten Veränderungen der texturalen Porosität, nur mit den jeder benutzten Klassen anfänglichen Porositätwerten Rechenschaft ab :

— Das Uneinwirkung gesetz, wo die Porosität des Systems auf eine ununtergebrochene Weise zwischen der angrenzenden Werten der anfänglichen Porositäten sich abändert ;
— Das Einfacheinwirkunggesetz, wo die Porosität des Systems durch eine in Beziehung auf die Werten der anfänglichen Porositäten sehr hervorragender Minimum überschritt.

On dieses so begrenzte Gebiet lässt ein ununtergebrochenes theoretisches Modell Störungen in der Ordnung der Bildelementen dazwischentreten ; dieses Modell verträgt sich mit den geemes senen Werten der Porosität. Für einzigen sterischen Einwirkungen hängen die Parameter der Störung einem empirischen Gesetz gemäss, von der Grösse der Elementen ab. Für vorher durch Wassereinwirkung abänderte Bodenelementen, besteht eine Anordnung der Tonmineralem um die Elementen des Gerippes herum ; diese Anordnung verursacht eine physikalische Einwirkung die sich an der Versperrungeffekten unterschieb, ùnd die Störungparameteraùslegung schwierig macht.


## РЕЗЮМЕ


### Изучение некоторых закономерностей порозности.

Ж. К. ФИЕС, С. ХЕНЕН, Г. МОННЬЕ при техническом сотрудничестве К. ЖАНДЕ.

Общая порозность почвы является следствием комбинированного действия физических, механических, биологических, или химических факторов на составляющий эту почву материал, и относительного расположения элементарных ее частичек. В данной работе проанализирован этот последний аспект, с помощью различиных теоритических моделей.

Модели эти поясняют последствия некоторых правил об'единения частичек двух категорий для порозности, и из сравнения величин порозности рассчитанных с помощью этих моделей, с экспериментальными данными, делаются следующие выводы :

— в крайних случаях одинаковости размеров частичек взаимодействия не наблюдается и это означает что порозность смеси является средней уравновешенной обеих категорий частичек;

— во всех остальных случаях обнаруживаются более, или менее комплексные взаимодействия. Значит, общая порозность смеси меньше чем порозность каждой категории составляющей смесь, рассматривающейся в качестве характерной для каждой из них. В виду того, что применяющиеся соотношения не принимают во внимание ни форму частичек, ни геометрию из размещения, типы взаимодействия указывающие на изменения порозности можно истолковывать в зависимости от размещения составных. Данная работа является, значит, синтетическим решением задачи и может служить примером применения предлагающихся моделей в качестве приема для анализа.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Fiès J.-C., 1970. Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale. *Sci. Sol*, **2**, 27-37.

Fiès J.-C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.*, **22**, 6, 655-685.

Furnas C. C., 1929. Flow of gases through beds of broken solids. *Bur. Mines. Bull.*, **307**, 1-139.

Graton L. C., Fraser H. J., 1935. Systematic paching of spheres with particular relations to porosity and permeability. *J. Geology*, **43**, 785-909.

Hénin S., Fiès J.-C. et Monnier G., 1970. Étude théorique de la porosité des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *C. R. Acad. Sci.*, **271**, 1960-1963.

Kheyrabi D., Monnier G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19**, 2, 129-152.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 655-571.

# CARENCE EN MAGNÉSIUM DU POMMIER *GOLDEN DELICIOUS* EN CULTURE HYDROPONIQUE

J.-G. HUGUET et F. LIMOUZIN *
avec la collaboration technique de J. GIRAUDON

*Station d'Agronomie, I. N. R. A.,*
*33140 Pont-de-la-Maye*

* *École Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux*
*33170 Gradignan*

RÉSUMÉ

La culture hydroponique de pommiers *Golden Delicious*, dans des conditions variées d'alimentation magnésienne, a permis de mesurer l'efficacité de pulvérisations foliaires de sulfate de magnésium, par le contrôle : de la croissance, des consommations de solution nutritive, des teneurs foliaires en éléments majeurs et de l'évolution du système foliaire. Les divers symptômes de la carence en Mg et en K chez cette variété sont décrits. Un antagonisme K-Mg très marqué est à l'origine de la sensibilité de la variété *Golden Delicious* à la carence magnésienne. Cette étude permet de considérer la carence magnésienne comme responsable de certains cas de chute prématurée des feuilles du pommier *Golden Delicious*. Les pulvérisations foliaires de Mg semblent être une méthode de prévention efficace, à condition d'en définir les modalités pratiques d'utilisation dans les vergers.

## A. — INTRODUCTION

Depuis longtemps déjà, les arboriculteurs s'inquiètent d'un accident qui survient, plus ou moins régulièrement, sur certaines variétés de pommier et notamment sur *Golden Delicious*. Le phénomène débute par l'apparition brutale sur les feuilles de taches nécrotiques desséchées, de couleur rouille, réparties irrégulièrement sur le limbe ; une chute prématurée des feuilles les plus atteintes, qui sont habituellement les plus âgées, provoque rapidement un aspect caractéristique des rameaux, dont toute la partie inférieure est dégarnie.

Cette chute prématurée est l'un des symptômes observés régulièrement lors

de la carence magnésienne sur arbres fruitiers en général (MULDER, 1950) et notamment sur le Pommier (WALLACE, 1961 ; BLANCHET, 1954 ; DELAP, 1957 ; TROCMÉ et GRAS, 1964 ; JACOB, 1961). Mais la littérature consacrée à la carence en Mg sur *Golden Delicious* ne fait pas état de l'apparition brutale de taches nécrotiques irrégulièrement réparties, observées avant la chute prématurée des feuilles. Par exemple, d'après MONOYER (1958), sur *Golden Delicious*, il y a d'abord décoloration vers le jaune pâle de la zone marginale du limbe et des tissus situés entre les nervures principales ; des taches nécrosées apparaissent ensuite sur les parties décolorées. Il est bien entendu connu que d'autres accidents peuvent entraîner la chute des feuilles. Un déficit en eau et des températures trop élevées peuvent provoquer un grillage des feuilles, comparable au folletage de la vigne, et la chute des feuilles atteintes (CHAFFARD, 1962), mais, dans ce cas, il y a nécrose brutale de toute une partie du limbe, en particulier de la pointe de la feuille, sans apparition de taches nécrotiques dispersées. De plus, les produits de traitement, notamment le soufre, employés dans de mauvaises conditions peuvent provoquer des brûlures et des chutes très précoces de feuilles, mais les symptômes sont caractéristiques et très différents de ceux observés en général avant les chutes de feuilles, en été, sur pommier *Golden Delicious*. Par leurs dimensions et leur distribution générale, ces taches nécrotiques sur *Golden Delicious* n'ont également rien de comparable avec celles que provoquent sur certains arbres fruitiers (cerisiers, poiriers) les bactéries phytopathogènes, *Phyllostacta* en particulier, qui ne serait qu'un parasite exceptionnel des feuilles de Pommier (VIENNOT-BOURGIN, 1961).

Il paraissait logique de penser que le magnésium pouvait jouer un rôle à la fois dans le phénomène de nécrose et dans la chute prématurée des feuilles (CHAFFARD, 1962), d'autant plus que la variété *Golden Delicious* est particulièrement sensible à l'insuffisance de Mg (BLANCHET, 1954). Pour vérifier cette hypothèse, nous avons cherché à étudier, en milieu contrôlé, le comportement du pommier *Golden Delicious* soumis à des conditions très différentes d'alimentation en Mg et à mesurer l'effet de pulvérisations foliaires de sulfate de magnésium sur la croissance et le développement de cette variété.

## B. — MATÉRIEL ET TECHNIQUE

### 1. — *Techniques de culture*

Les essais ont été réalisés avec des pommiers cultivés sur sable de quartz, dans des pots à réserve de solution (alimentation ascendante), sous abri vitré à toit et parois mobiles. L'apport des solutions nutritives correspondant aux traitements ne débutait qu'après le débourrement des arbres. Pour chaque pot, la réserve de solution (2,4 l) était complétée plusieurs fois par semaine de manière à assurer une alimentation en eau régulière. Tous les huit jours, les pots étaient entièrement vidés, puis rincés à l'eau permutée, de façon à éviter les accumulations de sels dans le quartz. Au moment de leur première mise en place, les arbres étaient des scions d'un an rabattus à 30 cm ; on a élagué sévèrement leur système radiculaire chaque année.

### 2. — *Protocole des essais*

*Essai n° 1.* — Cet essai, mis en place en mars 1969, comprenait 16 pommiers *Golden Delicious* greffés sur M. M. 104. Pendant la période de repos hivernal, les arbres étaient mis en jauge en plein air. Les traitements, répétés quatre fois, étaient les suivants :

— solution complète + 6 pulvérisations de sulfate de magnésium = T + 6
— solution enrichie en magnésium + 6 pulvérisations ..... = 2 Mg + 6
— solution sans potassium + 6 pulvérisations ..... = sans K + 6
— solution sans magnésium + 6 pulvérisations ..... = sans Mg + 6.

Les pulvérisations de sulfate de magnésium n'ont été réalisées qu'en 1971 et les résultats présentés ne concernent que cette seule année.

*Essai nº 2.* — Cet essai, en place depuis février 1971, comportait 36 pommiers *Golden Delicious*, greffés sur M.M.106. Il comprenait six traitements et six répétitions :

— solution complète, pas de pulvérisations ..... = T
— solution complète + 3 pulvérisations ..... = T + 3
— solution complète + 6 pulvérisations ..... = T + 6
— solution sans magnésium, pas de pulvérisations ..... = sans Mg
— solution sans magnésium + 3 pulvérisations ..... = sans Mg + 3
— solution sans magnésium + 6 pulvérisations ..... = sans Mg + 6.

### 3. — *Composition des solutions nutritives*

La composition des solutions nutritives est indiquée au tableau 1.

TABLEAU I

*Composition des solutions nutritives*

| | Traitements | | | |
|---|---|---|---|---|
| | T | 2 Mg | Sans Mg | Sans K |
| méq./l | | | | |
| $NaH_2PO_4$, $H_2O$ | $Na^+$ : 0,26 ; $H^+$ : 0,52 ; $PO_4^{---}$ : 0,78 | | | |
| $Ca(NO_3)_2$ | $Ca^{++}$ : 8 ; $NO_3^-$ : 8 | | | |
| $K_2SO_4$ | $K^+$ : 2,4 ; $SO_4^{--}$ : 2,4 | | | 0 ; 0 |
| $MgSO_4$, 7 $H_2O$ | $Mg^{++}$ : 2,4 ; $SO_4^{=}$ : 2,4 | $Mg^{++}$ : 4,8 ; $SO_4^{=}$ : 4,8 | 0 ; 0 | $Mg^{++}$ : 2,4 ; $SO_4^{=}$ : 2,4 |
| mg/l | | | | |
| $MnSO_4$, 4 $H_2O$ | 1,68 | | | |
| $CuSO_4$, 5 $H_2O$ | 0,19 | | | |
| $ZnSO_4$, 7 $H_2O$ | 0,24 | | | |
| $H_3BO_3$ | 0,13 | | | |
| $NH_4Mo_7O_{24}$, 4 $H_2O$ | 0,07 | | | |
| Sequestrène-138 Fe | 40 | | | |

### 4. — *Pulvérisations foliaires*

A la suite des travaux de différents auteurs (Ford, 1967-1968 ; Forshey, 1959 ; Allen, 1964), nous avons utilisé le sulfate de magnésium, $MgSO_4$, $7H_2O$, à 2 p. 100 pour effectuer des pulvérisations foliaires, selon les mêmes modalités dans les deux essais. La première pulvérisation a été faite le 7 mai, les suivantes à des intervalles de 15 jours. Les arbres des traitements sans pulvérisation de magnésium ont reçu, dans les mêmes conditions, des applications d'eau permutée.

5. — *Techniques d'analyse foliaire*

Les cinq feuilles correspondant à un échantillon sont lavées, de façon à éliminer un dépôt éventuel de magnésium non absorbé, séchées, puis broyées (limbes et pétioles). Après minéralisation au four, le phosphore est dosé par céruléomolybdimétrie selon la méthode DUVAL (1962), et le potassium, le calcium et le magnésium par spectrophotométrie de flamme en milieu oxine (DELAS, 1964).

## C. — RÉSULTATS

### *Commentaires à propos des graphiques*

Les dates des pulvérisations foliaires de magnésium sont signalées en abscisses par les chiffres romains de I à VI. Pour chaque observation, on a indiqué la plus petite différence significative entre les traitements sous forme d'un segment vertical. Lorsque les calculs ont été faits sur les données transformées, la signification des résultats est seulement indiquée dans le texte.

1. *Description des symptômes foliaires de carence en magnésium et en potassium.*

L'essai n° 1, poursuivi pendant trois ans, nous a permis de noter les différentes manifestations, sur les feuilles, des carences en magnésium et en potassium. On peut distinguer deux périodes d'observation :

— l'année de mise en culture, il y a installation progressive de la carence, à mesure que les réserves se diluent dans l'arbre en croissance ;
— les années suivantes, la carence devient aiguë car les exportations (chute des feuilles, différentes tailles) diminuent les réserves, alors que les besoins de l'arbre augmentent avec l'âge.

Les résultats de ces observations figurent dans le tableau 2.

Il faut remarquer que les symptômes décrits correspondent à des conditions expérimentales données, qui imposent notamment aux arbres carencés de ne vivre que sur leurs seules réserves de magnésium et de potassium. En plus des symptômes ainsi observés dans ces conditions particulières, d'autres sont possibles. A noter également que les symptômes d'installation de l'insuffisance magnésienne se traduisent dans nos essais par des taches nécrotiques absolument comparables à celles que l'on peut observer dans les vergers avant la chute prématurée des feuilles en été.

2. *Résultats des analyses de feuilles.*

Les prélèvements en vue de l'analyse foliaire ont eu lieu à trois dates : 5 mai, 20 juin et 4 août 1971 soit, respectivement : 22, 68 et 113 jours après la pleine floraison de l'essai n° 1.

L'échantillon élémentaire était constitué des feuilles de même rang de cinq rameaux d'un même arbre (6e feuille pour le premier prélèvement, 7e pour le second et 8e pour le troisième).

a) *Teneurs en cendres* (figures 1-1 et 1-2).

*Essai 1.* — Il existe de grandes différences de teneurs en cendres suivant les traitements. C'est le traitement sans magnésium qui a donné le poids de cendres le

TABLEAU 2

*Symptômes foliaires de carence sur Pommier* Golden Delicious *en milieu synthétique*

| | | Carence en magnésium | Carence en potassium |
|---|---|---|---|
| Début de la carence | Mai-juin-juillet | Feuilles les plus âgées : taches nécrotiques desséchées brun-rouille, de position indéterminée par rapport aux nervures et sans symétrie systématique par rapport à la nervure centrale. | Feuilles vert plus sombre. |
| | Juillet-août-septembre | Au centre de la feuille, plage ovale régulière (1/3 surface limbe) décolorée, (seules les nervures principales restent vertes).<br>Des taches nécrotiques desséchées sur cette plage décolorée précèdent de peu la chute de la feuille. | Feuilles les plus jeunes : taches brun clair limitées par le réseau de nervures de 4e ordre, qui se groupent en macules diffuses s'allongeant dans la partie centrale des deux demi-limbes.<br>Augmentation des surfaces atteintes avec aspect plus foncé.<br>En même temps, sur d'autres feuilles : taches nécrotiques desséchées brun foncé en position marginale. |
| Carence très aiguë | Mai-juin-juillet | Grand nombre de taches nécrotiques desséchées et jointives, sans plage décolorée, soit dans le centre de la feuille soit entre les nervures principales, soit sur toute la surface.<br>Décoloration de la plus grande partie du limbe : couleur de fond vert clair, zone vert-foncé le long des nervures principales. Auréole brune entre les 2 zones. Dans la zone décolorée : taches brunes, jointives, arrondies, nombreuses, en position marginale. Superposées à l'ensemble, quelques taches nécrotiques desséchées par évolution des taches brunes.<br>Aspect général bariolé très caractéristique. | Petites taches brun-violet limitées par le réseau des nervures de 4e ordre, groupées en macules diffuses dans la zone marginale des pointes de feuilles.<br>Évolution des macules en taches nécrotiques brun foncé gagnant toute la bordure de la partie centrale de chaque demi-limbe, le centre de la feuille reste vert foncé.<br>Parfois, sur les feuilles les plus jeunes : discrète auréole autour de la feuille. |
| | Juillet-août-septembre | Forte décoloration internervaire tirant sur le jaune, les nervures jusqu'au troisième ordre restent foncées, donnant un *aspect anguleux en arête de poisson*, avec superposition de grandes taches nécrotiques desséchées. | Centre de la feuille foncé à *contours arrondis donnant un aspect en feuille de chêne*. Le reste de la feuille est nécrosé et desséché, de couleur rouille, un mince liséré jaune sépare la zone verte de la zone desséchée.<br>Sur les feuilles terminales, séries de taches irrégulières jointives de couleur brun foncé sur les bords et entre les nervures principales. |
| Symptômes généraux | | Les feuilles atteintes tombent prématurément, les rameaux se dégarnissent à partir de la base. | Pas de chute prématurée. Feuilles plus petites plus rondes, vert plus foncé avec des nervures plus marquées et une forme soit en gouttière, soit arquée. |

*Nota.* — A partir de juillet, les symptômes d'une même carence peuvent coexister à tous les degrés sur le même arbre.

plus important, tandis que le traitement sans potassium a produit le poids le plus faible. Nous verrons plus loin que les teneurs en cendres varient comme les teneurs en K, ce qui s'explique par la proportion importante de potasse dans les cendres.
*Essai 2.* — Dans cet essai, il n'y a pas de différences significatives des teneurs en cendres.

b) *Teneurs en magnésium* (fig. 2-1 et 2-2).

*Essai 1.* — Les arbres des différents traitements ont des teneurs d'autant plus fortes que leur richesse relative en K est plus faible. L'augmentation des teneurs en Mg dans les feuilles des plantes du traitement sans magnésium + 6 pulvérisations relève sans doute essentiellement de l'action des pulvérisations foliaires, les trois premières paraissant les plus efficaces.

*Essai 2.* — L'examen de la figure 2-2 permet de distinguer trois groupes de traitements. Comme on pouvait le penser, aux traitements T + 6 et T + 3 correspondent toujours les teneurs les plus élevées et au traitement sans Mg et sans pulvérisations les teneurs les plus faibles ; par contre, les traitements sans Mg + 6, T et sans Mg + 3 se classent dans le même groupe, avec des teneurs en magnésium se situant entre les teneurs extrêmes correspondant aux deux groupes précédents. Il faut donc admettre qu'à ce stade des arbres et pour la période étudiée, 3 et 6 pulvérisations de sulfate de magnésium sur les feuilles, sans absorption de magnésium par les racines, assurent une alimentation comparable à celle assurée par la solution de référence. De plus, cette alimentation semble insuffisante puisque les teneurs en magnésium sont inférieures à 0,30 p. 100 de la matière sèche, quantité généralement considérée comme faible. Les résultats résumés dans ce graphique nous permettent déjà de penser que la variété *Golden Delicious* est particulièrement sensible en matière d'alimentation magnésienne.

Il nous a paru intéressant de pousser plus loin l'interprétation statistique des résultats de la troisième analyse foliaire, en ce qui concerne les teneurs en Mg.

*Interprétation de la teneur en Mg des feuilles*

| Origine de la variation | F calculé | F théorique | Signification |
|---|---|---|---|
| Effet traitements | 26,6 | 3,85 | HS |
| Effet Mg dans la solution | 81,6 | 7,77 | HS |
| Effet Mg en pulvérisations | 25,5 | 5,57 | HS |
| Effet pente des pulvérisations | 49,0 | 7,77 | HS |
| Écart par rapport à la droite | 1,9 | | NS |
| Interaction $\frac{\text{Mg pulvérisations}}{\text{Mg solution}}$ | 0,3 | 5,57 | NS |

Le magnésium de la solution nutritive, comme celui apporté par les pulvérisations foliaires, a une action hautement significative sur la teneur en magnésium des feuilles vers la fin de la saison. En outre, il est particulièrement remarquable de ne pas trouver d'interaction entre le magnésium de la solution et le magnésium des

pulvérisations. L'augmentation des teneurs en Mg des feuilles, à la suite de la pulvérisation de cet élément, est donc indépendante de la présence ou de l'absence de Mg dans le milieu nutritif.

Cette étude nous a permis de déterminer la droite de régression correspondant à l'effet des pulvérisations de Mg.

c) *Effet moyen des pulvérisations de magnésium.*

$x$ : nombre de pulvérisations foliaires de magnésium ;

$y$ : teneur en Mg dans la feuille, exprimée en p. 100 de matière sèche.

$$y = 26{,}50 + 2{,}42\ x$$

Cette droite nous donne l'effet moyen des pulvérisations pour l'ensemble de l'essai, sans tenir compte de l'absence ou de la présence de Mg dans la solution.

d) *Teneurs en potassium* (fig. 3-1 et 3-2).

*Essai 1.* — Suivant les traitements, les teneurs en K sont d'autant plus faibles que la richesse relative en Mg des solutions est plus forte ; on doit rapprocher cette observation du phénomène observé précédemment pour le magnésium (diminution de la teneur en Mg des feuilles quand la teneur en K des solutions augmente). Il semble que l'absorption de l'ion Mg soit limitée par les ions K, et inversement. Cependant, à la dernière analyse, la teneur en K des feuilles n'est pas modifiée par l'élévation de la concentration en Mg de la solution nutritive (traitement T et Mg double). Ceci est à rapprocher d'observations faites sur porte-greffes de pommiers (M. VII), cultivés en solution nutritive, pour lesquels les symptômes de carence magnésienne apparaissaient dans les cas où le rapport K/Mg de la solution était élevé, indépendamment de la teneur en magnésium, tandis que la carence potassique se manifestait uniquement avec les solutions à très faible teneur en potassium (EAST-MALLING, 1960).

*Essai 2.* — Seule l'inversion nette du classement des teneurs obtenues avec les traitements T et sans Mg entre la première et la dernière analyse témoigne de l'installation progressive de la sous-alimentation magnésienne.

Les graphiques (fig. 4-1 et 4-2) donnent l'évolution des rapports K/Mg dans les feuilles ; ils mettent nettement en évidence l'antagonisme K-Mg, mais ils permettent également de mesurer l'efficacité des pulvérisations de Mg.

Dans l'essai 1, pour le traitement sans Mg + 6 pulvérisations, on observe une diminution très importante de ce rapport qui passe de 26 à 12 entre les dates de la première et de la quatrième pulvérisation ; cet effet est également marqué pour le traitement T + 6 ; pour ces deux traitements, ce rapport se stabilise par la suite. Ce résultat permet de conclure à une plus grande efficacité apparente des trois premières pulvérisations.

e) *Teneurs en calcium et en phosphore.*

Dans aucun de nos essais nous n'avons pu mettre en évidence de différence significative, selon les traitements, entre les teneurs foliaires en ces deux éléments.

3. *Évolution des symptômes foliaires de carence en magnésium.*

Les graphiques (fig. 5-1 et 5-2) indiquent l'évolution du pourcentage de feuilles atteintes de symptômes de carence magnésienne (au moins deux taches nécrotiques

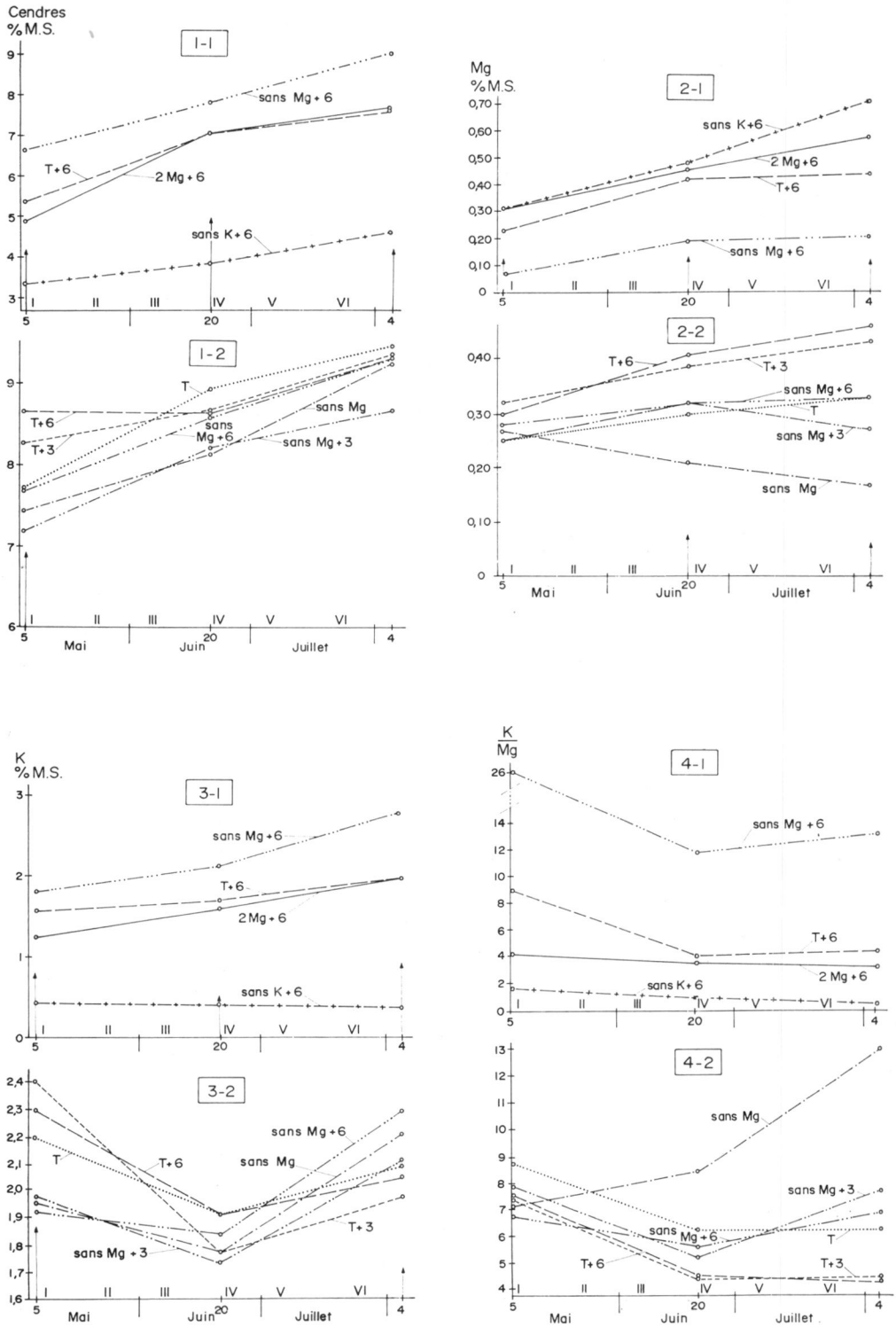

Cendres
%M.S.
1-1
sans Mg + 6
T+6
2 Mg + 6
sans K + 6
1-2
T
T+6
T+3
sans
Mg+6
sans Mg
sans Mg+3
Mg
%M.S.
2-1
sans K+6
2 Mg+6
T+6
sans Mg + 6
2-2
T+6
T+3
sans Mg+6
T
sans Mg+3
sans Mg
K
%M.S.
3-1
sans Mg+6
T+6
2Mg+6
sans K+6
3-2
T
T+6
sans Mg+6
sans Mg
T+3
sans Mg+3
K
Mg
4-1
sans Mg +6
T+6
2 Mg+6
sans K+6
4-2
sans Mg
sans Mg+3
sans Mg+6
T
T+6
T+3
I
II
III
IV
V
VI
5
20
4
Mai
Juin
Juillet

FIG. 1, 2, 3, 4

desséchées) par rapport au nombre de feuilles présentes sur le rameau au moment du comptage.

*Essai 1.* — On remarque que le traitement sans Mg se signale toujours par les pourcentages les plus élevés de feuilles atteintes de symptômes de carence ; par contre, pour le traitement sans K, il n'y a jamais ni symptôme de carence en magnésium, ni chute prématurée de feuilles. Quant aux traitements T et Mg double, ils présentent quelques taches nécrotiques, avec légère chute de feuilles, ce qui permet de supposer que, malgré la présence de magnésium dans la solution, l'alimentation magnésienne est encore légèrement déficiente. Cette insuffisance de l'alimentation magnésienne, pour les traitements T et Mg double, est sans doute due à une teneur en potassium de la solution suffisamment élevée pour induire un effet d'antagonisme ionique au détriment de l'absorption magnésienne.

Si on rapproche ce graphique de ceux des teneurs foliaires en K et en Mg et des rapports K/Mg on a la confirmation du rôle de l'antagonisme K/Mg dans l'apparition des taches nécrotiques.

Les pulvérisations de Mg provoquent sur le traitement sans Mg un reverdissement des zones décolorées de certaines feuilles et un infléchissement de la courbe des pourcentages à partir de la mi-juin. Dans le cas des traitements T et Mg double, les pourcentages de nécroses sont toujours très faibles et non significatifs, alors que l'année précédente (1970), en l'absence de pulvérisations de Mg, leurs pourcentages d'atteinte étaient significativement différents de zéro et voisins de 25 p. 100.

*Essai 2.* — A partir du 6 juillet, nous constatons que le groupe présentant le plus de symptômes de carence est constitué par les traitements sans Mg, sans Mg + 3 et T. La présence du traitement T est à noter particulièrement. On peut également remarquer sur le traitement sans Mg + 3 que l'efficacité des pulvérisations foliaires (arrêtées le 6 juin) est visible jusqu'au 19 juin, date à partir de laquelle le pourcentage de nécroses augmente brusquement. Dans le second groupe, significativement moins atteint par la carence, on trouve les traitements sans Mg + 6, T + 3 et T + 6. S'il paraît logique que le traitement T + 6 soit le moins atteint, il est, par contre, remarquable de trouver également le traitement sans Mg + 6 dans ce groupe peu atteint ; tout se passe comme si, pour cet essai, l'alimentation magnésienne de l'arbre était mieux assurée par 6 pulvérisations de Mg sans apport de cet élément par la solution que dans le cas d'une croissance sur une solution complète, sans apport supplémentaire par pulvérisations foliaires. Cette observation et le fait que, dans les deux essais, les traitements les mieux protégés soient ceux qui, en plus du Mg de la solution, reçoivent six pulvérisations nous conduisent à penser que, pour le pommier *Golden Delicious*, les pulvérisations foliaires de Mg peuvent se révéler un complément indispensable de l'alimentation magnésienne.

4. *Conséquences des carences en Mg et en K sur la fructification* (fig. 6-1 et 7-1).

Dans l'essai n° 1, dont les arbres en place depuis trois ans ont fleuri au printemps 1971, on a pratiqué, sur chaque fleur, une fécondation complémentaire. Le tableau suivant donne l'importance de cette floraison selon les traitements.

Ce tableau vient confirmer l'effet reconnu de la carence en K sur l'exagération de la floraison et l'effet inverse de la carence en Mg qui est également connu.

Très précocement, les arbres des traitements sans Mg perdent tous leurs fruits,

sans que la première pulvérisation ralentisse ce phénomène. Quant au traitement sans K, malgré une floraison très abondante, la nouaison le ramène rapidement à un niveau de production inférieur à celui des traitements T et Mg double.

| Traitements | Nombre moyen de fleurs par arbre |
|---|---|
| Sans potassium | 91 |
| Magnésium double | 38 |
| Solution complète (T) | 30 |
| Sans magnésium | 16 |

L'incidence du manque de Mg sur la fructification paraît donc particulièrement importante chez le pommier *Golden Delicious* en diminuant la floraison et en provoquant ensuite une chute complète des jeunes fruits.

5. *Croissance des rameaux en longueur et en diamètre.*

Au début des essais, on a choisi sur chaque arbre un rameau de même position, dont on a mesuré tous les 15 jours la longueur totale et le diamètre à 10 cm au-dessus de l'insertion.

*Essai 1.* — D'après le graphique correspondant à l'essai n° 1 (fig. 8-1), jusqu'au début du mois de juillet deux groupes de traitements se distinguent : celui des arbres bien alimentés (T et Mg double) et celui des arbres carencés (sans Mg et sans K). Pendant cette première période, les allongements moyens peuvent se classer dans l'ordre suivant :

sans K : 9 cm ; sans Mg : 16 cm ; T et Mg double : 27 cm.

Au début de cette période, les traitements T et Mg double avaient en moyenne des rameaux d'un tiers plus long que ceux des traitements sans K ou sans Mg.

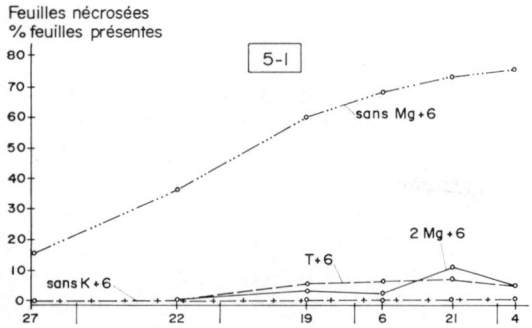
A partir de juillet, nous constatons que la courbe correspondant au traitement sans Mg tend à se rapprocher de celle des traitements bien pourvus pour ne plus s'en distinguer statistiquement à partir de fin juillet. Si l'on mesure les allongements moyens entre le 6 juillet et le 4 août on obtient le classement suivant :

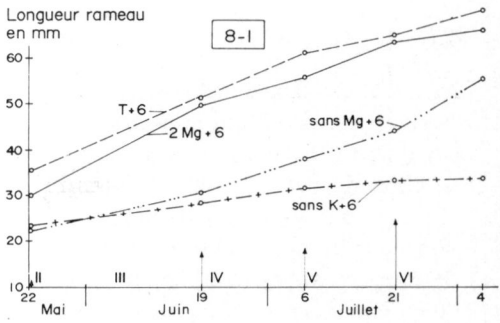
sans K : 2 cm ; T et Mg double : 10 cm ; sans Mg : 17 cm.

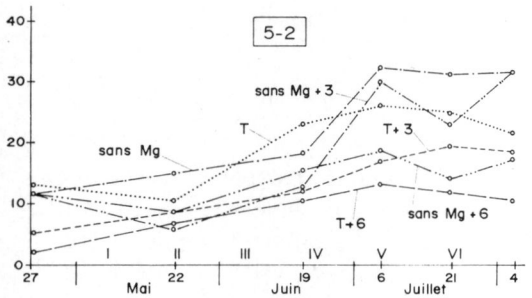
(Il s'agit d'allongement et non de la longueur totale des rameaux.)

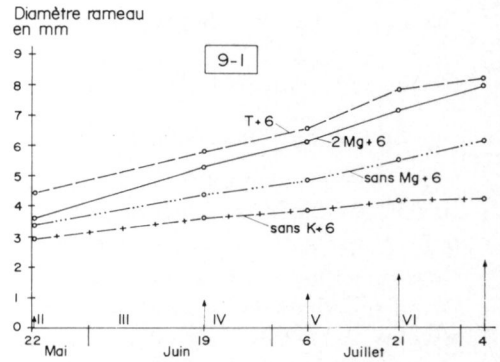
Les arbres du traitement sans K, carencés depuis 1969, ont donc une croissance presque nulle, tandis que ceux qui sont bien alimentés présentent un ralentissement normal de croissance. Les arbres qui reçoivent une solution nutritive dépourvue de Mg ont une croissance active. Cette croissance, normale puis accélérée des pommiers complètement privés de Mg depuis trois ans, s'explique par l'action des pulvérisations foliaires de sulfate de Mg, effectuées sur l'ensemble de l'essai n° 1 à partir du 7 mai.

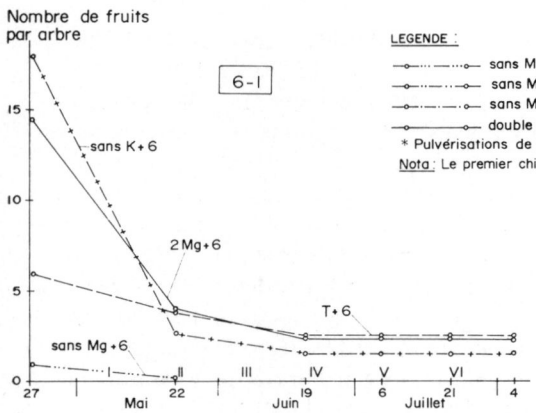
L'examen du graphique traduisant l'évolution de la croissance en épaisseur des rameaux dans l'essai n° 1 (fig. 9-1) confirme les résultats précédents ; cependant, l'action des pulvérisations de Mg semble plus rapide puisque la croissance en épaisseur des rameaux du traitement sans Mg est régulière pendant toute la période d'étude



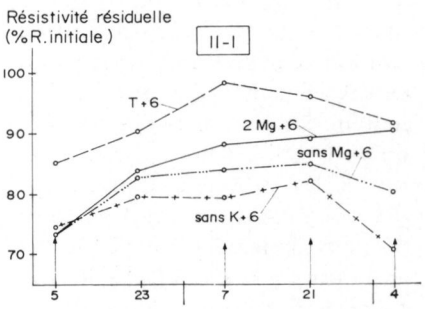

LEGENDE : Solutions Nutritives

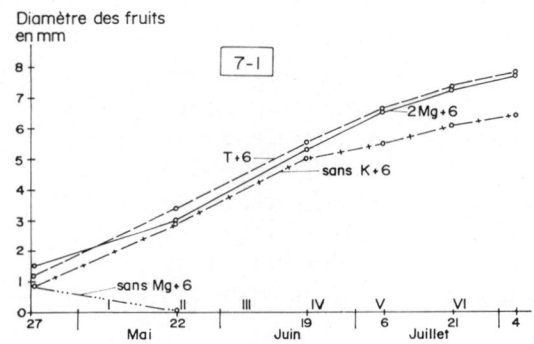
- sans Mg+6 pulvérisations*
- sans Mg+3 "
- sans Mg
- double dose Mg+6 "
- sans K+6 pulvérisations
- T+6 "
- T+3 "
- T

* Pulvérisations de $MgSO_4, 7H_2O$ à 2 %

P.P.D.S. 5 %

Nota : Le premier chiffre indique le N° de Figure, le second indique le N° de l'Essai .



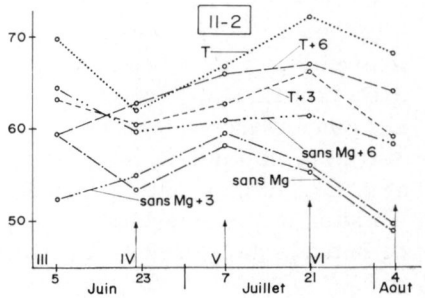




FIG. 5, 6, 7, 8, 9, 11

*Essai 2.* — Dans cet essai, il n'apparaît pas de différence significative entre traitements en ce qui concerne la longueur ou le diamètre des pousses. Cependant, à partir du 22 mai, les valeurs moyennes pour les traitements sans Mg dans la solution de culture sont toujours inférieures aux valeurs moyennes des traitements recevant une solution complète (T). On a pu également noter que les valeurs obtenues dans le traitement sans Mg et sans pulvérisations étaient toujours inférieures à celles de tous les autres traitements. Par ailleurs, les rythmes de croissance en longueur et en épaisseur sont réguliers pendant toute la période d'étude. On peut attribuer cette absence de réponse à l'existence de réserves en Mg suffisantes pour assurer une croissance normale pendant cette première année de culture.

6. *Nutrition minérale.*

a) *Vitesse d'absorption de la solution nutritive.*

La détermination de la quantité de solution consommée par pot, en 48 heures, se fait par différence entre le volume constant de solution renouvelée (2,4 l) et le volume restant dans le réservoir du pot au bout des 48 heures (mesurée par vidange dans une éprouvette graduée). La surface des pots étant recouverte par une feuille de polyéthylène, cette différence correspond à la seule absorption de liquide par le végétal. A l'occasion de chaque vidange, la résistivité était mesurée sur une partie aliquote de la solution restante ; cette mesure était répétée tous les 15 jours.

*Essai n° 1.* — L'examen de la figure 10-1 fait apparaître, pour le traitement sans Mg, deux périodes distinctes : avant et après le 19 mai. Avant cette date, bien que les différences ne soient pas significatives, on peut noter que seuls les arbres de ce traitement se caractérisent par des consommations décroissantes alors que, pendant cette même période, les plantes des autres traitements doublent au moins leur consommation tous les quinze jours. On note ensuite une augmentation régulière des consommations du 19 mai au 4 août. Cela confirme le phénomène analogue noté pour la croissance et s'interprète également comme la conséquence des pulvérisations de sulfate de magnésium qui, en fournissant du Mg à des arbres carencés en cet élément depuis trois ans, induisent une reprise de la végétation. La consommation des pommiers des traitements T et Mg double augmente régulièrement jusqu'au 23 juin, date à partir de laquelle elle marque un palier. Dans le traitement sans K, la consommation augmente également, en se maintenant toutefois à des niveaux beaucoup plus bas mais, à partir du 23 juin, il y a une baisse brutale qui, en l'absence de chute de feuilles, s'explique par l'augmentation de la surface nécrosée des feuilles en raison de la carence en K. Les effets de la carence en potassium sont peut-être exagérés par les pulvérisations de sulfate de magnésium

*Essai n° 2.* — D'après la figure 10-2, les arbres recevant des solutions nutritives complètes ont des consommations voisines et régulièrement croissantes pendant toute la période d'observation, quel que soit le nombre de pulvérisations foliaires. Les comportements des arbres des divers traitements sans Mg sont identiques entre eux jusqu'au 9 juin mais se distinguent de ceux des arbres recevant des traitements avec Mg. Jusqu'à cette date, il semble que le manque de Mg se traduise par une stabilisation des consommations, les deux premières pulvérisations de Mg n'ayant pas eu le temps de faire effet. A partir de début juillet, la consommation du traitement

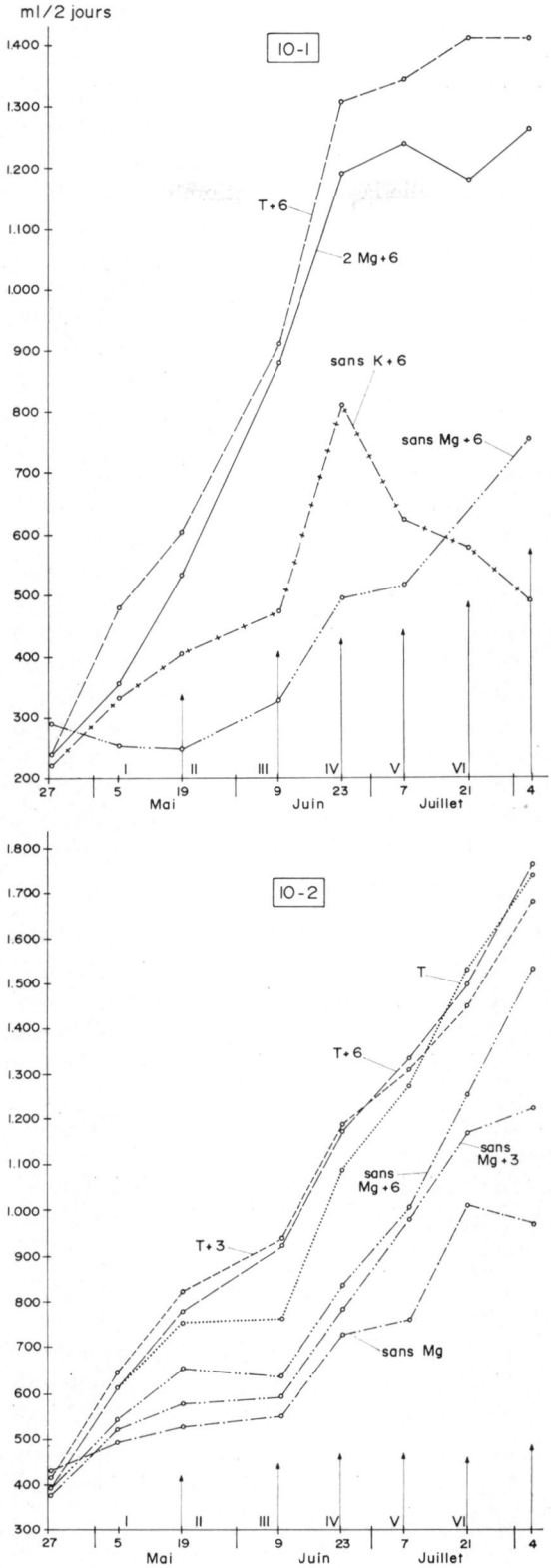

ml/2 jours
10-1
T+6
2 Mg+6
sans K+6
sans Mg+6
1.400
1.300
1.200
1.100
1.000
900
800
700
600
500
400
300
200
I
II
III
IV
V
VI
27
5
19
9
23
7
21
4
Mai
Juin
Juillet
10-2
T
T+6
T+3
sans Mg+6
sans Mg+3
sans Mg
1.800
1.700
1.600
1.500
1.400
1.300
1.200
1.100
1.000
900
800
700
600
500
400
300

FIG. 10

sans Mg devient significativement différente de celle des deux autres traitements sans Mg mais avec pulvérisations de Mg. Pour ces deux derniers traitements (sans Mg + 3 ou 6 pulvérisations), les courbes de consommation se confondent jusqu'à fin juillet, date à partir de laquelle la consommation, dans le traitement sans Mg + 6 pulvérisations, augmente jusqu'à devenir comparable à celle observée pour les traitements avec solution nutritive complète. Par contre, à partir de fin juillet, la consommation des plantes du traitement Mg + 3 pulvérisations augmente peu et se rapproche de celle du traitement sans Mg. Ainsi, l'action des trois premières pulvérisations de sulfate de Mg sur la consommation de solution nutritive n'est sensible que pendant un mois et demi.

La consommation de solution doit satisfaire les besoins en eau de la plante à la fois pour son métabolisme et pour sa transpiration. La quantité d'eau métabolisable étant négligeable devant l'importance relative de la masse d'eau transpirée, on peut dire que la quantité de solution absorbée représente sensiblement la quantité d'eau transpirée par la plante pendant le même temps. Celle-ci étant, toutes autres conditions égales par ailleurs, proportionnelle à la surface foliaire active, on peut alors dire que les quantités de solution consommées en donnent une image au moment de l'observation. Il faut supposer que les modifications éventuelles du métabolisme pour les arbres des différents traitements ne changent pas — ou très peu — la quantité d'eau transpirée par unité de surface de feuille. Le graphique 10-2 met alors très nettement en évidence: d'une part, l'importance du facteur magnésien vis-à-vis de la surface foliaire et, d'autre part, l'efficacité des pulvérisations de Mg sur la conservation du système foliaire. L'alimentation magnésienne n'ayant pas d'influence sur la dimension des feuilles (MULDER, 1950), les pulvérisations de sulfate de magnésium agissent en limitant les surfaces de feuilles nécrosées et la chute des feuilles.

b) *Évolution de la résistivité des solutions.*

Cette mesure donne une image de la concentration globale du milieu en ions. Les deux graphiques (fig. 11-1 et 11-2 ; p. 665) donnent les résistivités des solutions restant dans la réserve des bacs au bout de 48 heures de culture, exprimées en p. 100 des résistivités initiales des solutions correspondant aux différents traitements.

La première constatation, très générale, valable pour les deux essais quel que soit le traitement et pour toute la période d'observation, est que les solutions résiduelles ont toujours une résistivité inférieure à la résistivité des solutions d'origine. Il y a donc toujours concentration des solutions, les arbres absorbant l'eau plus vite que les éléments nutritifs. On peut également remarquer que la concentration globale des solutions complètes devient significativement inférieure à celle des solutions carencées ; cet effet s'accentue avec le temps.

*Essai 1.* — Il est probable que le rapprochement, en fin de période, des courbes correspondant aux traitements T et Mg double et la séparation des courbes des traitements sans K et sans Mg soient la conséquence des pulvérisations de Mg.

*Essai 2.* — On peut remarquer le comportement identique des traitements sans Mg et sans Mg + 3 pulvérisations, tandis que le traitement sans Mg + 6 pulvérisations s'en distingue à partir de début juillet.

## D. — CONCLUSIONS

L'ensemble des résultats obtenus permet de tracer le bilan des effets d'une nutrition magnésienne insuffisante sur le pommier *Golden Delicious*. La croissance ne semble pas affectée dans l'immédiat par un déficit magnésien, mais la persistance de celui-ci finit par l'arrêter presque totalement. Ce phénomène semble aller de pair avec la rapidité et l'intensité de reprise de croissance, lorsque des pulvérisations de Mg sont appliquées à des arbres profondément carencés. Tout se passe donc comme si l'alimentation magnésienne des zones de croissance active était assurée en priorité. Cette observation est en accord avec la littérature existant sur les mouvements du Mg dont les teneurs dans les méristèmes sont plus élevées que dans le reste de la la plante (BUKOVAC, 1960).

Par contre, il semble que le système foliaire accuse immédiatement une diminution de l'alimentation magnésienne par une réduction de sa surface, comme l'indiquent nettement les modifications de la consommation de solution nutritive. Cette diminution de la surface foliaire est notamment due à la chute précoce des feuilles. L'étude des consommations de solution met également en évidence le rôle protecteur des pulvérisations de Mg vis-à-vis du système foliaire, en cas de carence en cet élément dans le milieu nutritif. L'interprétation des analyses de feuilles permet d'attribuer au pommier *Golden Delicious* une forte sensibilité à l'antagonisme K-Mg, qui peut se traduire par une absorption déficitaire de Mg.

Par ailleurs, des pulvérisations de Mg augmentent très significativement la teneur en Mg des feuilles. En fin de saison, celle-ci est proportionnelle au nombre de pulvérisations et, de plus, cet enrichissement des feuilles est indépendant de la présence ou de l'absence de Mg dans le milieu nutritif. Les teneurs en Mg des feuilles présentant une carence aiguë peuvent se situer, pour nos essais, au-dessous de 0,25 p. 100 de matière sèche. De même, il semble que, dans la feuille, les rapports K/Mg supérieurs à 5 soient, pour la variété *Golden Delicious*, l'indice d'une insuffisance magnésienne.

Nous avons pu également remarquer que les pulvérisations précoces sont les plus efficaces et que l'effet bénéfique des trois premières pulvérisations se maintient environ un mois. Il faut cependant noter que l'effet des pulvérisations plus tardives est loin d'être négligeable puisque nous avons pu remarquer plusieurs fois que 6 pulvérisations, réparties du 7 mai au 21 juillet, assuraient une alimentation magnésienne aussi efficace — ou plus — que celle fournie par la solution nutritive complète de référence (T).

Pour ce qui est du développement proprement dit, une carence aiguë en magnésium entraîne une floraison diminuée et une fructification nulle vis-à-vis desquelles les pulvérisations foliaires interviennent trop tard pour avoir une action, au moins la première année. La malnutrition magnésienne se traduit dans tous les cas par une chute prématurée des feuilles et, selon sa gravité, par divers symptômes semblables à ceux observés dans les vergers. On peut donc supposer qu'en général la maladie de la chute prématurée des feuilles de *Golden Delicious* a pour origine une insuffisance magnésienne, pouvant être en relation avec un excès de K.

Dans les conditions de nos essais, les pulvérisations de Mg se sont révélées capables

de pourvoir à la nutrition magnésienne du *Golden Delicious*. Il reste à vérifier l'efficacité de telles pulvérisations foliaires sur la maladie de la chute prématurée des feuilles dans le cas des vergers, en précisant les conditions pratiques d'utilisation du sulfate de magnésium ou d'autre produits capables d'apporter du Mg aux feuilles.

D'autre part, la fertilisation des vergers de pommiers *Golden Delicious* devrait éviter tout excès de fumure potassique risquant de provoquer une carence magnésienne chez cette variété particulièrement sensible à l'antagonisme K-Mg.

*Reçu pour publication en mai 1972.*

## SUMMARY

### DEFICIENCY IN MAGNESIUM OF THE HYDROPONICALLY-CULTIVATED « GOLDEN DELICIOUS » APPLE TREE

Hydroponic cultivation of the *Golden Delicious* apple tree, under various magnesium-nutrition conditions, has permitted to gauge the efficiency of magnesium-sulphate leaf-spraying by monitoring the growth, consumption of nutrient solutions, leaf-content of major elements and evolution of the foliage. The various signs denoting deficiency in magnesium and potassium in this variety are described. Susceptibility of the *Golden Delicious* variety to magnesium deficiency arises from a marked potassium/magnesium antagonism. This investigation enables to consider that, in some instances, the untimely leaf drop in the *Golden Delicious* apple-tree is brought about by magnesium deficiency. Magnesium-spraying of leaves is apparently an efficient preventive method, provided that directions of use in orchards are properly set out.

## ZUSAMMENFASSUNG

### MAGNESIUMMANGEL BEI DER APFELSORTE « GOLDEN DELICIOUS » IM HYDROPONISCHEN (FÜSSIGBEET)-ANBAU

Der hydroponische Anbau von *Golden Delicious*-Äpfeln unter verschiedenen Magnesium-Ernährungsbedingungen hat es ermöglicht, die Wirksamkeit der « Auf-Blatt-Zerstäubung » von Magnesiumsulfat, durch Wachstumskontrollen, Nährlögungsaufnahme, Blattanalysen der Hauptelemente sowie durch die Blattsystementwicklung zu messen. Die verschiedenen Symptome des Magnesium - und des Kalimangels werden für diese Apfelsorte beschrieben. Ein sehr ausgeprägter Gegensatz zwischen Magnesium und Kali ist wohl der Grund der Empfindlichkeit dieser Sorte für Magnesiummangel. Diese Untersuchung erlaubt, es in gewissen Fällen den vorzeitigen Blattafall bei diesen Äpfelbäumen dem Magnesiummangel zuzuschreiben. Die Blattzerstäubungen von Magnesium scheinen eine wirksame Vorbeugungsmethode zu bieten, vorausgesetzt, dass man den praktischen Einsatz in den Plantagen genau umreisst.

## РЕЗЮМЕ

### Недостаток магния в гидропонной культуре яблони « Гольден Делишес ».

Ж. Г. ЮГЕ, Ф. ЛИМУЗЕН.

Гидропонная культура яблони « Гольден Делишес » в различных условиях магниевого питания позволила определить эффективность листовых опрыскиваний сернокислым магнием, при помощи контроля :

роста, потребления питательного раствора, содержания главных питательных элементов в листьях, и эволюции листового аппарата. Описываются разные симптомы недостатка магния и калия у этого сорта. Ярко выраженный антагонизм калий — магний является главной причиной чувствительности сорта «Гольден Делишес» к недостатку магния. Это изучение позволяет допустить что недостаток магния — ответственен, в некоторых случаях, за преждевременное опадение листвы этого сорта. Листовые опрыскивания магнием могут служить, как кажется, эффективным методом предохранения, с условием чтобы предварительно определились практические способы применения этой обработки в садах.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEN M., 1964. The uptake of magnesium from foliar sprays applied to apple trees. *Contr. Nutr. Miner.*, Coll. Montpellier.

BLANCHET R., 1954. Observations sur la carence magnésienne du pommier. *Ann. agron.*, **1**, 119-126.

BUKOVAC, 1960. Absorption and mobility of magnesium in the bean. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **75**, 429-434.

CHAFFARD M., 1962. Noircissement des feuilles de poirier et chute prématurée des feuilles de *Golden Delicious*. *C. R. Congrès Pomol.*, Avignon, 1962.

DELAP A. V., FORD E. M., 1958. How spray cultures assist the study of apple nutrition. *Annu. Rep. East-Malling Res. Sta.*

DELAS J., 1964. Spectrophotométrie de flamme en milieu oxine. Application au dosage du calcium et du magnésium dans les sols et les végétaux. *Ann. Agron.*, **15**, 633-649.

DUVAL L., 1962. Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **15**, 633-649.

EAST MALLING, 1960. *Annu. Rep. Res. Sta.*, p. 22.

FORD E., 1967. Studies in the nutrition of apple rootstocks. IV. The effect of growth and mineral compotion of supplying magnesium through the leaves. *Ann. Bot. Lond.*, **31**, 113-119.

FORD E., 1968. Studies in the nutrition of apple rootstocks. V. The development of magnesium deficiency symptoms in relation to magnesium supply. *Ann. Bot. Lond.*, **32**, 5-456.

FORSHEY C. G., 1959. The effect of nitrogen status of magnesium deficient *Mac Intoch* apple trees on the respons to Epsom salts sprays. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 73.

JACOB A., 1961. *La magnésie, cinquième élément majeur de l'alimentation des plantes*. Édit. Dangles Paris.

MONOYER G., 1958. La fumure magnésienne. *Le Fruit Belge*, **202**, 89-93.

MULDER D., 1950. Magnesium deficiency in fruit trees on sandy soils and clay soils in Holland. *Plant and Soil*, **2**, 145-157.

TROCMÉ S., GRAS R., 1964. *Sol et fertilisation en arboriculture fruitière*. Édit. G.-M. Perrin, Paris.

VIENNOT-BOURGIN G., 1961. Notes de pathologie végétale. *Ann. Épiphyt.*, **12**, 1, 1961, 115-119.

WALLACE T., 1961. *The diagnosis of mineral deficiencies in plants*. Long-Ashton Res. Sta., Univ. of Bristol.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 673-684.

NOTE ANALYTIQUE

# L'IONOMÉTRIE : SES POSSIBILITÉS D'APPLICATION AU DOSAGE DE L'AZOTE NITRIQUE ET DE L'AZOTE AMMONIACAL EN AGRONOMIE

Rose MAZOYER
avec la collaboration technique de Irène AGIUS

*Station d'Agronomie, I. N. R. A.,*
*Boulevard du Cap*
*06602 Antibes*

## RÉSUMÉ

L'emploi d'une électrode spécifique échangeuse de nitrates et d'une électrode spécifique échangeuse d'ammonium a permis de mettre au point des méthodes de dosage de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal dans les extraits de sols, de végétaux et dans les solutions nutritives utilisées en culture hydroponique.

## INTRODUCTION

L'ionométrie, nouvelle technique de dosage des anions et des cations, s'est rapidement développée ces dernières années avec la mise au point d'électrodes spécifiques échangeuses d'ions. Ces électrodes, utilisées avec un millivoltmètre de grande précision, permettent de mesurer directement l'activité et la concentration de certains anions et cations en solution.

Quand de telles électrodes sont immergées dans une solution contenant l'ion spécifique, il se développe un potentiel de membrane entre l'électrode et la solution dont on mesure l'activité. Or, on appelle potentiel de membrane « la différence de potentiel qui s'établit entre deux solutions aqueuses séparées par une membrane et le terme de membrane est généralisé pour désigner toute phase non aqueuse interposée entre deux solutions aqueuses ». Ce potentiel est proportionnel au logarithme de l'activité à mesurer. On sait qu'à une température et à une pression donnée, la

différence de potentiel n'est fonction que de l'activité de l'ion en solution. Elle suit alors la loi de Nernst, c'est-à-dire pour un ion monovalent :

$$E = K - 2{,}3 \frac{RT}{F} \cdot \log A$$

E mesure le potentiel total du système,
K est un potentiel constant qui ne dépend que de l'électrode de référence et de la solution interne,
$2{,}3 \frac{RT}{F}$ est le facteur de Nernst,
A est l'activité de l'ion en jeu.

Nous ne développerons pas davantage la théorie de ces électrodes, un livre du « National Bureau of Standards » de Washington (DURST, 1969), ainsi qu'un article très complet de GAVACH (1971) apportent toutes les précisions susceptibles d'intéresser les utilisateurs de telles électrodes.

Pour déterminer le cœfficient d'activité de l'ion étudié, il suffit d'établir une courbe d'étalonnage à partir de solutions étalons et de mesurer le potentiel développé, en tenant compte toutefois de la concentration totale de tous les ions dans l'échantillon. On trace sur un papier semi-logarithmique la courbe obtenue en portant sur l'axe linéaire les potentiels d'électrode en millivolts et, sur l'axe logarithmique, les valeurs d'activité.

Mais, ce qui intéresse généralement l'analyste, c'est de mesurer la concentration de l'ion en solution. Cette mesure se fait d'une manière identique à celle des mesures d'activité ; dans ce cas, la courbe d'étalonnage est tracée à partir de solutions étalons de concentrations connues. Là encore, il convient de se rappeler que les solutions étalons devraient avoir une force ionique totale voisine de la force ionique de l'échantillon à doser.

Afin d'éviter une variation du coefficient d'activité supérieure à 2 p. 100, on peut se référer à la notice d'utilisation des électrodes spécifiques :

« Avec des échantillons de force ionique inférieure à $10^{-3}$ M, la différence des forces ioniques entre les échantillons et les étalons peut supporter un facteur de 5, sans qu'il y ait de sérieuses erreurs. Mais, entre $10^{-2}$ et $10^{-3}$ M, la force totale ionique des échantillons doit être dans les limites de $\pm$ 50 p. 100 par rapport à celle des échantillons pour que les mesures de concentration aient une précision de $\pm$ 2 p. 100. Entre $10^{-1}$ et $10^{-2}$ M, les limites doivent être de $\pm$ 20 p. 100 pour avoir une précision de $\pm$ 2 p. 100. »

Il existe sur le marché plusieurs types d'électrodes, à savoir :

1° des électrodes à membrane de verre ; ce sont celles utilisées pour les mesures d'activité de $Na^+$... $K^+$... par exemple, très voisines de conception des électrodes de mesure de pH;

2° des électrodes à cristaux (monocristallines ou à cristal mixte, ou à élément polycristallin aggloméré) pour des mesures d'anions tels que $Cl^-$, $Br^-$, $I^-$, $CN^-$, $S^{--}$, $F^-$, ainsi que certains cations : $Cd^{++}$, $Cu^{++}$, etc...

3° des électrodes à membrane de liquide organique non miscible à l'eau. Ce liquide est maintenu en place dans le corps de l'électrode par un disque de membrane inerte et poreuse.

Les électrodes que nous utilisons pour le dosage de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal sont des électrodes à membrane adaptée à l'ionomètre de la firme Orion, qui est un millivoltmètre de précision couvrant un domaine de mesure allant de + 999,9 à — 999,9 millivolts à $\pm$ 0,1 millivolt.

## A. — DOSAGE DES NITRATES

L'électrode spécifique des nitrates mesure l'activité des ions nitrates ; elle peut servir, également, à mesurer la concentration des nitrates en solution. L'électrode utilisée pour ce travail est celle de la firme Orion n° 92-07.

Nous avons étudié successivement :

1° les courbes d'étalonnage,

2° les interférences,

3° les applications :

*a*) dosage des nitrates dans les végétaux;

*b*) dosage des nitrates dans les sols;

*c*) dosage des nitrates dans les solutions nutritives.

### 1. — *Les courbes d'étalonnage*

Nous avons tracé ces courbes en fonction des concentrations en azote nitrique.

a) *Courbe d'étalonnage des nitrates en solution aqueuse.*

Cette courbe est linéaire de 1 g/litre environ de $N_{NO_3^-}$ jusqu'à 5 mg/litre ; en deçà de 5 mg/litre, cette courbe a tendance à s'infléchir, mais jusqu'à 2 mg/litre elle est très reproductible.

La valeur obtenue avec notre appareil et notre électrode, pour une solution de nitrates contenant 10 mg $N_{NO_3^-}$/litre, est aux environs de 135 millivolts (ce chiffre peut varier selon les électrodes). L'appareil utilisé nous permet de ramener ce chiffre à une valeur fixe appelée « relatif millivolt », que nous avons fixé à 100, ce qui nous permet d'avoir une courbe passant toujours par ce point 100. La courbe d'ailleurs est parfaitement reproductible (fig. 1).

b) *Courbe d'étalonnage des nitrates en milieu tampon ionique $CaCl_2$ N/100.*

Nous verrons dans le paragraphe du dosage de l'azote nitrique dans les sols, les raisons du choix d'un tel milieu (fig. 1).

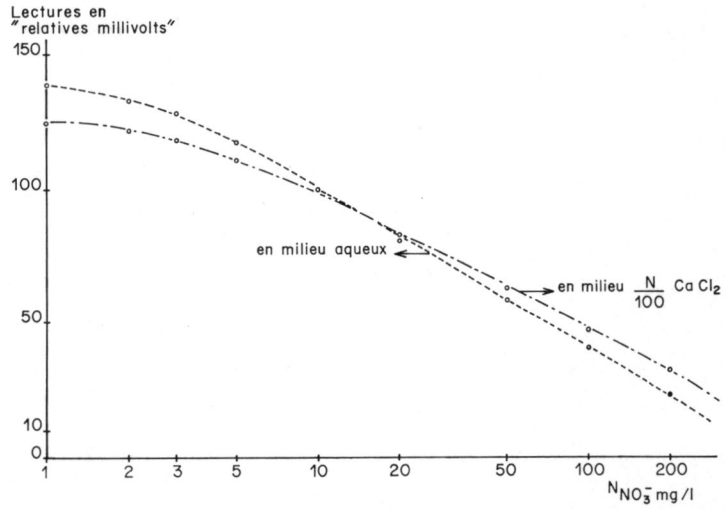



FIG. 1. — *Dosage de $N_{NO_3^-}$ par ionométrie ; milieu aqueux et milieu $CaCl_2$ N/100*

c) *Courbe d'étalonnage des nitrates en milieu complexe.*

Il convient de rappeler qu'il est toujours indispensable de tracer une courbe étalon avec des solutions faites dans le milieu dans lequel on aura à doser les nitrates. C'est ainsi que pour le dosage de $N_{NO_3^-}$ en milieu hydroponique, les solutions étalons sont préparées à partir des solutions nutritives servant à la culture.

d) *Calcul.*

Pour calculer les concentrations, remarquons qu'il serait possible, dans le domaine linéaire, de faire un calcul logarithmique à partir d'une gamme donnée. En effet, on calculerait le logarithme de la concentration en fonction de la lecture en millivolts. Cependant, l'expérience montre qu'il est plus rapide de se rapporter directement à un graphique, surtout pour les analyses de série.

### 2. — *Les interférences*

Les constructeurs d'électrodes indiquent les interférences inhérentes à chaque électrode. Toutefois, nous avons étudié les principales interférences susceptibles de nous intéresser dans le cas des dosages des nitrates dans les extraits de sols (principalement sols de serre) ou des extraits végétaux. Ce sont naturellement les anions, à savoir : $SO_4^{--}$, $Cl^-$, $NO_2^-$.

*a*) $SO_4^{--}$ jusqu'à la concentration de 50 mg/l pour une concentration en $N_{NO_3^-}$ de 10 mg/l n'interfère pas.

*b*) $Cl^-$ interfère dans ce dosage. Pour une concentration de 10 mg/l en $N_{NO_3^-}$, il y a une erreur positive de 2 p. 100 pour une concentration égale en $Cl^-$ (chlorure de potassium) ; elle est de 10 p. 100 pour une concentration en $Cl^-$ de 50 mg/l. Il convient donc, par le test rapide avec le nitrate d'argent, de s'assurer de la présence ou de l'absence de chlorures.

Pour éliminer les chlorures perturbateurs, PAUL et CARLSON (1968) proposent une méthode originale, à savoir : agiter l'extrait avec 1,5 ml de résine Dowex 50 × 8 (50 à 100 mesh) saturée par de l'argent. Nous n'avons pas expérimenté cette méthode, n'ayant pas de végétaux riches en chlorures et les sols de serre sont généralement très pauvres en chlorures.

*c*) $NO_2^-$ est, parmi les anions étudiés, le plus nuisible dans ce dosage. Heureusement, il est généralement en concentration nulle ou très faible dans la majorité des extraits de sols et nul dans ceux des végétaux. A concentration égale, $N_{NO_2^-}$ et $N_{NO_3^-}$, l'erreur est de 20 p. 100. Notons qu'elle est déjà sensible à 2 mg/l.

Il n'y a aucun cation interférent. Enfin disons qu'en solution aqueuse, il est possible de travailler dans un intervalle de pH allant de 2 à 12 (selon la firme Orion).

TABLEAU I

*Tableau des interférences*

| Anions | Concentration mg/l $N_{NO_3^-}$ | Concentration mg/l anions interférents | Erreur % |
|---|---|---|---|
| $SO_4^{--}$ | 10 | 50 | 0 |
| $Cl^-$ | 10 | 10 | 2 |
| | 10 | 50 | 10 |
| $N_{NO_2^-}$ | 10 | 2 | 2 |
| | 10 | 5 | 15 |
| | 10 | 10 | 20 |

### 3. — *Application*

a) *Dosage de l'azote nitrique dans les extraits végétaux*

Le dosage de l'azote nitrique dans les végétaux se fait généralement par la méthode suivante : dans un ballon Kjeldhal, on introduit 500 mg de poudre végétale, préalablement séchée à l'étude à 110°C, on ajoute 20 ml environ d'eau déminéralisée, puis 5 g de magnésie. On distille par entraî-

nement à la vapeur pour chasser l'azote ammoniacal généralement en quantité très faible dans les végétaux. On laisse refroidir, on ajoute 500 mg de poudre de Devarda, on fixe le ballon Kjeldhal sur l'appareil à distiller. On laisse agir 1/4 d'heure à froid. Puis on distille par entraînement à la vapeur d'eau en recueillant le distillat dans une solution à 2 p. 100 d'acide borique.

Par cette méthode, nous avons effectué 24 dosages sur une même poudre végétale (Raygrass), ce qui nous a permis d'établir le coefficient de variation qui est de 9 p. 100, avec une moyenne d'azote nitrique de 0,32 p. 100.

Mais les nitrates étant très solubles dans l'eau, il est possible de les extraire en agitant la poudre végétale dans de l'eau déminéralisée. Nous avons alors adopté le protocole d'extraction suivant :

— *sur matériel sec :*

On pèse 500 mg ou 1 g de poudre végétale (séchée préalablement à l'étuve à 110°C) que l'on met dans un erlenmeyer de 100 ml, on ajoute 50 ml d'eau déminéralisée et on agite 1/2 heure à l'agitateur mécanique, on filtre.

— *sur matériel frais :*

On broie la totalité de l'échantillon à analyser au mixeur, avec 200 ml ou 500 ml d'eau déminéralisée, selon l'importance de l'échantillon à analyser. On filtre.

Le dosage de l'azote nitrique dans ces extraits aqueux peut se faire :

— soit par distillation avec entraînement à la vapeur d'eau en présence de magnésie et de poudre Devarda, en recueillant le distillat dans l'acide borique à 2 p. 100 ;

— soit par ionométrie : les électrodes (l'électrode de mesure et l'électrode de référence) sont immergées dans la solution à doser. On agite la solution à la main en évitant la formation de bulles sur la membrane de l'électrode spécifique. On laisse la solution se reposer et, après une minute, on fait la lecture en millivolts. Le temps de réponse de l'électrode est généralement très rapide (quelques secondes) quand on dose des solutions de concentrations en nitrates très voisines. Mais, dans les analyses de série, ces valeurs peuvent être très différentes d'un échantillon à l'autre, la réponse est alors plus lente. Remarquons que certains auteurs préfèrent l'agitation magnétique.

Nous avons effectué, par ces deux dernières méthodes, 24 dosages sur les mêmes extraits aqueux de la poudre végétale utilisée précédemment. Le coefficient de variation obtenu a été de 7 p. 100 avec une moyenne $N_{NO_3^-}$ de 0,31 p. 100 quand nous avons dosé l'azote nitrique par distillation, alors que le coefficient de variation a été de 4 p. 100 par la méthode ionométrique, avec une moyenne d'azote nitrique de 0,34 p. 100.

*En résumé nous avons :*

TABLEAU 2

| Méthodes | CV % | Écart-type | $N_{NO_3^-}$ % |
|---|---|---|---|
| 1° Dosage sur filtrat aqueux par ionométrie | 4 | $\sigma = 0{,}013\ 2$ | 0,34 |
| 2° Dosage sur filtrat aqueux par distillation..... | 7 | $\sigma = 0{,}021\ 7$ | 0,31 |
| 3° Dosage par distillation de la poudre végétale. | 9 | $\sigma = 0{,}028\ 8$ | 0,32 |

Le calcul du test $t$ montre que la différence des résultats n'est pas significative entre 0,34 et 0,32, ni entre 0,31 et 0,32, mais elle est significative entre 0,31 et 0,34.

Des comparaisons entre les différentes méthodes ont été faites à partir de matériel végétal divers.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

TABLEAU 3

| Matériel dosé | | Dosage par ionométrie | Dosage par distillation | Dosage par distillation de la poudre végétale |
|---|---|---|---|---|
| | | sur les mêmes extraits aqueux | | |
| Rosier | 1 | 0,04 | 0,03 | 0,04 |
| — | 2 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Dactyle | 1 | 0,28 | 0,29 | 0,20 |
| — | 2 | 0,25 | 0,25 | 0,24 |
| — | 3 | 0,31 | 0,30 | 0,28 |
| Artichaut | 1 | 0,17 | 0,17 | 0,16 |
| — | 2 | 0,20 | 0,20 | 0,18 |
| — | 3 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| — | 4 | 0,23 | 0,22 | 0,21 |
| Ray-Grass | 1 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| — | 2 | 0,25 | 0,23 | 0,25 |
| — | 3 | 0,24 | 0,23 | 0,20 |
| — | 4 | 0,36 | 0,32 | 0,35 |
| — | 5 | 0,37 | 0,33 | 0,35 |
| Tomate | 1 | 0,20 | 0,19 | — |
| (produit | 2 | 0,25 | 0,25 | — |
| frais) | 3 | 0,25 | 0,26 | — |
| — | 4 | 0,28 | 0,27 | — |

Compte tenu des résultats obtenus, on peut conclure que la méthode de dosage de l'azote nitrique dans les végétaux peut être effectuée avec précision par ionométrie, après extraction en milieu aqueux. Cette méthode simple, rapide, donne des résultats reproductibles et en bonne concordance avec les résultats obtenus par les méthodes habituelles de distillation.

b) *Dosage de l'azote nitrique dans les sols.*

Il serait particulièrement intéressant de pouvoir doser dans le même extrait de sols les trois formes d'azote : azote nitrique, azote ammociacal, azote nitreux. Les nitrates étant très solubles dans l'eau, un extrait aqueux conviendrait au dosage des nitrates par ionométrie. Mais, pour l'extraction des autres formes d'azote, il y a un certain nombre d'impératifs à respecter. En effet, l'extraction à l'eau ne permet pas d'extraire tout l'azote ammoniacal des sols ; on dissout les sels ammoniacaux, mais on n'extrait pas l'ammonium échangeable. Pour avoir une extraction complète des ions ammonium, on utilise, dans la plupart des laboratoires, une solution normale de $CaCl_2$. Il paraîtrait alors intéressant de doser par ionométrie les nitrates du sol extraits en solution $CaCl_2$ N. Mais la courbe d'étalonnage en milieu $CaCl_2$ N a un coefficient angulaire très petit et la méthode perd toute sa sensibilité. L'expérimentation a montré qu'en diminuant la concentration du chlorure de calcium jusqu'à $\frac{N}{100}$, on obtient une courbe très voisine de celle tracée en milieu aqueux.

Cette extraction peut avoir deux avantages : d'une part, la solution $CaCl_2 \frac{N}{100}$ joue le rôle de faible tampon ionique en maintenant une force ionique relativement constante, d'autre part, avec cette solution saline, on obtient une bonne filtration pour tous les types de sols. On élimine ainsi les particules d'argile colloïdales qui risquent de perturber le dosage. Mais, comme la théorie et la pratique le démontrent, la solution $CaCl_2 \frac{N}{100}$ est de concentration en $Ca^{++}$ insuffisante pour échanger la totalité des ions ammonium. Donc, de ce fait, il est exclu de doser sur un même extrait les trois formes d'azote minéral, si on doit doser l'azote nitrique par ionométrie.

Pour le dosage des nitrates, notre protocole est alors le suivant : Agiter 50 g de sol dans 100 ml de $CaCl_2 \frac{N}{100}$ pendant 1/2 heure, filtrer, faire le dosage par ionométrie.

Sur 34 sols de la région, nous avons dosé les nitrates, d'une part, par ionométrie, d'autre part, par distillation, sur le même extrait $CaCl_2 \frac{N}{100}$. Les résultats obtenus nous ont permis de

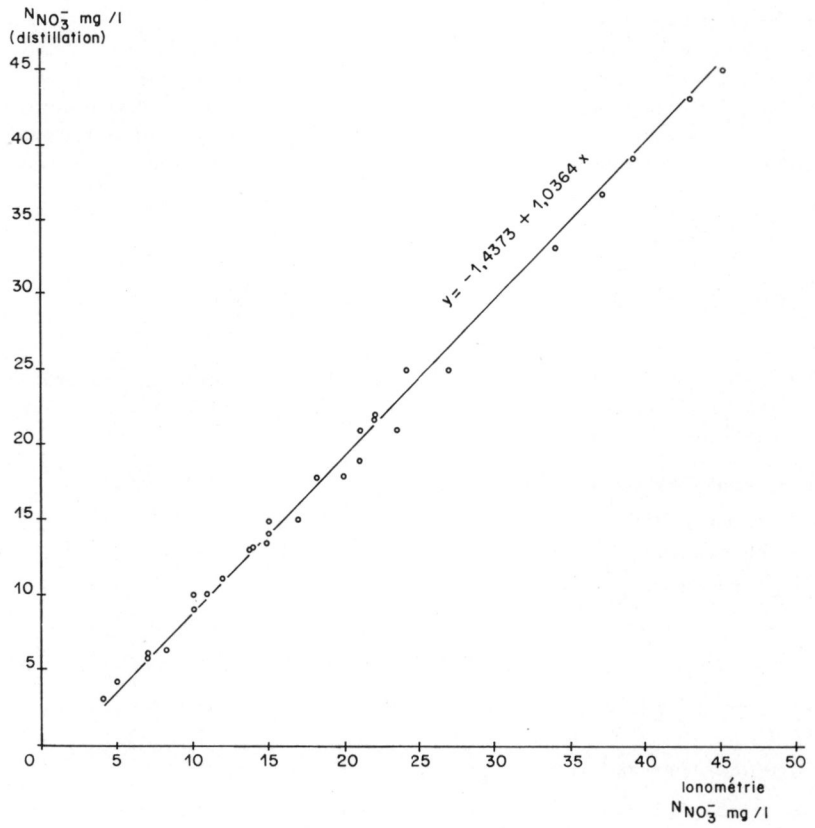



FIG. 2. — *Dosage de $N_{NO_3^-}$ dans les extraits de sols* (distillation et ionométrie)

tracer la droite de régression (fig. 2). En abscisse, nous avons porté les concentrations en azote nitrique obtenues par ionométrie, et, en ordonnées, les concentrations obtenues par distillation, exprimées en mg $N_{NO_3^-}$ par litre.

Si nous posons :

$$y = f \cdot (x)$$

$y$ étant les concentrations dosées par distillation et $x$ celles obtenues par ionométrie,

nous avons

$$r = 0{,}999\,4$$

et

$$y = 1{,}437\,3 + 1{,}036\,4\,x$$

La concordance est excellente.

Remarquons enfin que certains auteurs ont choisi l'extraction des nitrates des sols par l'eau déminéralisée.

c) *Dosage des nitrates dans les solutions nutritives.*

Les concentrations anioniques des solutions nutritives étant parfaitement définies, il est possible, par cette nouvelle technique de dosage, de contrôler rapidement, et avec précision, la teneur en nitrates de ces solutions.

Une application intéressante de l'utilisation de l'électrode spécifique des nitrates, dans le domaine de la Recherche, est la possibilité de suivre l'absorption des nitrates par des plantes cultivées en milieu hydroponique. La concentration des nitrates de la solution nutritive étant connue avant la mise en route de la culture, à tout moment, on peut suivre la diminution de concentration en nitrates de la solution nutritive au cours de la croissance des plantes.

## B. — DOSAGE DE L'AMMONIUM

L'électrode spécifique de $NH_4^+$ mesure l'activité des ions ammonium ; elle peut également servir à mesurer la concentration des ions ammonium en solution. L'électrode utilisée pour ce travail est celle des Éts Tacussel, électrode $P_{NH_4^+}$ M. L.

Nous avons étudié successivement :

1° les courbes d'étalonnage,

2° les interférences,

3° les applications.

### 1. — *Les courbes d'étalonnage*

Nous avons tracé les courbes en fonction des concentrations en azote ammoniacal.

a) *Courbe d'étalonnage en milieu aqueux.*

Cette courbe est linéaire de 1 g/l $N_{NH_4^+}$ jusqu'à 1 mg/l $N_{NH_4^+}$. La valeur obtenue pour une solution titrant 28 mg/l $N_{NH_4^+}$ est aux environs de 100 millivolts. Nous ramenons ce chiffre à 100 « relatives millivolts ». Nous avons ainsi la figure 3.

b) *Courbe d'étalonnage en milieu tampon ionique $CaCl_2$ N.*

La droite obtenue (fig. 3) a un coefficient angulaire légèrement plus faible que celui de la droite d'étalonnage en milieu aqueux et s'incurve à partir de 12 mg/l $N_{NH_4^+}$ environ.

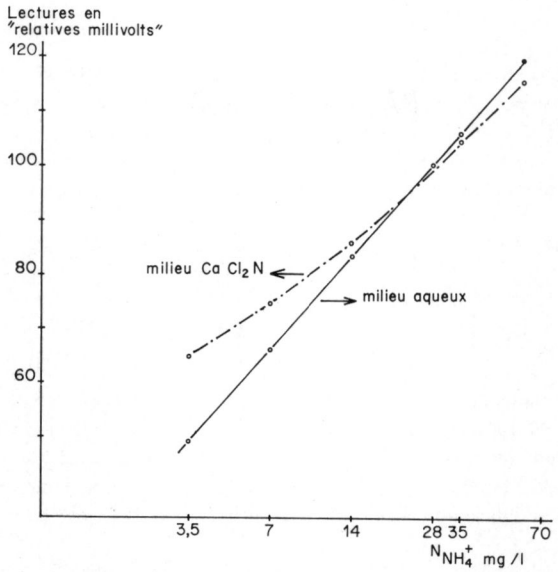



FIG. 3. — *Dosage de $N_{NH_4^+}$ par ionométrie ; milieu aqueux et milieu $CaCl_2$ N.*

2. — *Les interférences*

Les principaux cations susceptibles d'interférer sont les suivants : $Na^+$, $K^+$, $Ca^{++}$ et $Mg^{++}$. Nous avons obtenu les erreurs suivantes :

TABLEAU 4

| Cations | Concentration mg/l $N_{NH_4^+}$ | Concentration mg/l cations interférents | Erreur % |
|---|---|---|---|
| $Mg^{++}$ | 14 | 10 | 0 |
| | | 50 | 1,5 |
| | | 100 | 5,0 |
| $Ca^{++}$ | 14 | 10 | 1,0 |
| | | 50 | 7,0 |
| | | 100 | 8,0 |
| $Na^+$ | 14 | 10 | 1,2 |
| | | 50 | 7,0 |
| | | 100 | 12,0 |
| $K^+$ | 14 | 5 | 1,5 |
| | | 10 | 6,0 |
| | | 50 | 23,0 |
| | | 100 | 36,0 |

L'interférence du potassium est importante, celles du calcium et du sodium sont peu importantes et pratiquement du même ordre de grandeur, celle du magnésium est assez faible jusqu'à 50 mg/l.

### 3. — *Applications*

Les concentrations en azote ammoniacal dans les végétaux et dans les sols sont dans la majorité des cas trop faibles pour être dosées avec précision par ionométrie en raison des interférences. Mais, comme pour le dosage des nitrates, l'utilisation d'une électrode spécifique d'ammonium s'est révélée extrêmement intéressante pour suivre avec rapidité et précision l'absorption en cet élément par les plantes cultivées en milieu hydroponique.

## CONCLUSION

Les résultats obtenus par ionométrie pour le dosage des nitrates, dans les extraits de sols, de végétaux et dans les solutions nutritives, nous permettent de conclure que cette nouvelle technique analytique présente un très grand intérêt. La reproductibilité et la précision des résultats obtenus, l'extrême rapidité et la simplicité du dosage (comparées aux méthodes généralement utilisées pour doser l'azote nitrique en agronomie), en font une technique parfaitement bien adaptée au dosage de série.

Quant à l'électrode spécifique de l'ammonium, en tenant compte des interférences, elle peut être un instrument analytique utile. Nous étudions, actuellement, les possibilités d'élimination de l'interférence du potassium, ce qui permettrait ainsi une meilleure utilisation de cette électrode pour le dosage de l'azote ammoniacal dans les extraits de sols et de végétaux.

*Reçu pour publication en juin 1972.*

## SUMMARY

IONOMETRY : ITS APPLICATION TO THE DETERMINATION OF NITRIC NITROGEN AND AMMONIA NITROGEN IN AGRONOMY

The use of a specific nitrate exchanging electrode and a specific ammonium exchanging electrode has permitted the development of methods for the determination of nitric nitrogen and ammoniac nitrogen in soil extracts, vegetable extracts and nutrient solutions used in hydroponic culture.

## ZUSAMMENFASSUNG

DIE IONOMETRIE UND IHRE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN AN DIE QUANTITATIVE BESTIMMUNG DES STICKSTOFFES IN FORM VON NITRATEN UND AMMONIAKSALZEN IN DER ACKERBAUKUNDE

Durch den Einsatz einer spezifischen Nitrat-Austausch-Elektrode und einer spezifischen Ammonium-Austausch-Elektrode war es möglich Verfahren zur quantitativen Bestimmung des Stickstoffes in Form von Nitraten und Ammoniaksalzen in Bodenextrakten, Pflanzenextrakten und in Nährlösungen, die in der Hydroponik verwendet werden, zu entwickeln.

## РЕЗЮМЕ

Аналитическая библиографическая заметка. Ионометрия : возможности ее применения при дозировке нитратного и аммониакального азота в агрономии.

Роза МАЗУАЙЕ.

Применение специфических обменных электродов для нитратов и аммония позволило уточнить методы дозировки нитратного и аммониакального азота почвенных и растительных экстрактов, и питательных растворов употребляющихся в гидропонике.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


1. — *Généralités*

FASCICULE « INSTRUCTIONAL MANUAL ». *Nitrate ion electrode Orion research.* Inc. Cambridge Mass.

DAVIES J. E. *et al.*, 1972. Nitrate ion selective electrodes based on poly- vinyl chloride matrix membrane. *Analyst*, **97**, 87-94.

DURST R., 1969. *Ion selective electrodes.* National bureau of standards. Washington.

GAVACH Cl., 1971. Les nouvelles électrodes à membranes. *Bull. Soc. Chim.*, **9**, 3395-3407.

POTTERTON S. S., SHULTS W. D., 1967. Nitrate ion electrode liquide membrane. *Analyt. Lett. U. S. A.*, **1**, 11-12.

SCRINIVASAN K., RECHNITZ G. A., 1969. Selectivity studies on liquid membrane ion selective electrodes. *Anal. Chem.*, **41**, 1203-1211.

2. — *Nitrates*

a) *Sols.*

BREMMER J. M. *et al.*, 1968. Use of selective ion electrode for determination of nitrate in soils. *Analyt. Lett. U. S. A.*, **1**, 837-844.

QUIEN A., SELMER-OLSEN A. R., 1969. Nitrate determination in soil extracts with the nitrate electrode. *Analyst*, **94**, 888-894.

MACK A. R., SANDERSON R. S., 1971. Sensitivity of the nitrate ion membrane electrode in various soil extracts. *Canad. J. Soil Sci.*, **51**, 95-104.

MAHENDRAPPA M. K., 1959. Determination of nitrate nitrogen in soil extracts using a specific ion activity electrode. *Soil Sci.*, **108**, 132-136.

MYERS R. J. K., PAUL L. A., 1968. Nitrate ion electrode method for soil nitrate nitrogen determination. *Canad. J. Soil Sci.*, **48**, 369-373.

ONKEN A. B., SUNDERMAN H. D., 1970. Use of the nitrate electrode for determination of nitrates in soils. *Soil Sci. Plant analysis.*, **1**, 155-161.

b) *Plantes.*

BAKER A. S., SMITH R., 1969. Extracting solution for potentiometric determination of nitrate in plant tissues. *J. Agric. Food Chem.*, **17**, 1284-1287.

BARKER A. V. *et al.*, 1971. Nitrate accumulation in vegetables. *Agron. J.*, **63**, 126-130.

MILHAM P. J. *et al.*, 1970. Analysis of plants, soils and waters for nitrate by using an ion-selective electrode. *Analyst*, **95**, 751-757.

PAUL J. L., CARLSON R. M., 1968. Nitrate determination in plant extracts by the nitrate electrode. *J. Agric. Food Chem.*, **16**, 766-768.

VOOGT P., 1959. Determination of nitrate in spinach by means of a nitrate selective electrode. *Dt. Lebensmitt. Rdsch.*, **65**, 196-198. Résumé Abst. 1970 nº 2627.

c) *Eau.*

KEENEY D. R., *et al.*, 1970. Determination of nitrate in waters with the nitrate selective ion-electrode. *Analyst*, **95**, 383-386.

SHAN E. C., WILLEY P., 1969. Nitrate ion concentration in well water. *Calif. Agri.*, **5**, 11-15.

### 3. — *Ammonium*

GOODFELLOW G. I., WEBBER H. M., 1971. The determination of ammonia in boiler feed water with an ammonium selective glass electrode. *Analyst*, **97**, 95-103.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 685-699.

# SUR L'ÉNERGIE ACTIVE EN PHOTOSYNTHÈSE SON UTILISATION PAR DES GRAMINÉES AU COURS DE LEUR DÉVELOPPEMENT

## Cas particulier de peuplements de blé (1)

Ch. BALDY

*Station de Bioclimatologie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78000 Versailles*

## RÉSUMÉ

Cette étude est basée sur des données personnelles, étayées et considérablement complétées par une importante *analyse bibliographique* dont un quart au plus apparaît ici. La *première partie* est destinée à montrer l'influence de *l'énergie* lumineuse pour des cultures de Blé, en fonction du temps et des autres éléments du climat, et de la dynamique de la croissance du *peuplement.*

On s'attache ensuite à *l'évolution de la photosynthèse* en fonction de l'ontogenèse du Blé, de la croissance de sa surface foliaire développée et des caractéristiques de cette dernière. On rappelle brièvement l'état des connaissances des processus liés à la photosynthèse (dans le cas du Blé) et leurs modifications (des conditions artificielles permettent de mieux comprendre l'origine de certains phénomènes). Puis, on envisage l'*évolution* de la photosynthèse des *feuilles*, de la *plante* et du *peuplement* au cours de leur vie, et les *relations alimentaires* existant entre organes. On s'attache en particulier aux différences constatées dans la photosynthèse apparente en fonction des *génotypes* et des *conditions climatiques* et leur relation avec le *rendement.* L'influence des attaques parasitaires sur la photosynthèse est abordée, et on cherche en conclusion à proposer des voies pouvant conduire à des progrès *qualitatifs* et quantitatifs dans la productivité du Blé.

## INTRODUCTION

Dès 1921, Percival a publié une monographie *botanique* sur les Blés, et depuis cette date, des mises au point fréquentes paraissent à leur sujet, comme par exemple celle de Peterson (1965).

(1) La première partie de ce mémoire est présentée ici. La seconde partie, les résumés anglais, allemand et russe et la bibliographie générale seront publiés dans le prochain numéro des *Annales agronomiques.*

D'autre part, un grand nombre d'études *écologiques* ont porté sur les Blés tendres (*Triticum aestivum* L, em. THELL.), et à cet égard la monographie de AZZI (1927) et surtout la thèse de GESLIN (1944) sur les relations existant entre température et développement constituent deux bases toujours solides. De même, en ce qui concerne les Blés durs (*Triticum durum* DESF.), les conclusions de deux thèses parues récemment (AURIAU, 1964 ; GRIGNAC, 1965) ont fait progresser l'état de nos connaissances.

Très récemment, nous nous sommes intéressé à la croissance du système racinaire du Blé (BALDY, 1973 *a*), ainsi qu'aux relations mutuelles entre plantes dans des peuplements purs ou dans des associations de cultivars de Blés tendres (BALDY, 1973 *b*). L'objet du présent mémoire est de faire une synthèse des données relatives au rayonnement solaire et à la photosynthèse dans des peuplements de graminées, et spécialement de Blés.

Les études réalisées sur la croissance du Blé tiennent généralement compte des éléments du climat : mais les informations sur leur évolution dans le temps font fréquemment défaut, car plus de la moitié des références se rapportent à des conditions « contrôlées », ce qui n'est pas sans inconvénient ainsi que nous le soulignerons plusieurs fois dans ce mémoire.

*Dans une première partie,* nous apportons quelques éléments concernant le climat du Blé, en insistant surtout sur les points fréquemment négligés : *évolutions* quantitative et qualitative du rayonnement solaire selon l'heure et la saison ; *répartition spectrale* de l'énergie dans la végétation, en fonction de son stade de développement ; relations du *climat lumineux* et des autres éléments météorologiques.

*Dans une deuxième partie,* nous avons essayé de présenter la dynamique de la photosynthèse aux niveaux de la *plante* et du *peuplement* : effets génétiques et physiologiques ; influence du climat et de la position dans le champ ; rôle de chaque organe dans la *production du grain.*

Après avoir dégagé les domaines encore incertains, il a paru possible en conclusion d'envisager des voies de recherches qui pourraient conduire à des améliorations de la *proauctivité,* ainsi qu'à des améliorations de la *qualité* des Blés.

## PREMIÈRE PARTIE

## L'ÉNERGIE D'ORIGINE SOLAIRE. SON ÉVOLUTION AU COURS DU DÉVELOPPEMENT DU BLÉ

### A. — CARACTÈRES DE L'ÉNERGIE SOLAIRE INCIDENTE ; RAYONNEMENT TERRESTRE ET BILAN ÉNERGÉTIQUE

L'*énergie* incidente d'origine *solaire* est située dans une gamme de longueurs d'ondes allant de 300 à 3 000 nm environ, alors que les rayonnements *émis* par la terre et l'atmosphère sont émis surtout entre 6 000 et 20 000 nm. Leur étude est

développée dans de nombreux ouvrages, dont ceux de PERRIN DE BRICHAMBAUT (1963) et de ROBINSON (1966).

Le rayonnement solaire *global G* mesuré au sol sur une surface horizontale est composé d'un rayonnement *direct* incident *I*, dont la composante horizontale est *I sinh*, (*h* étant la hauteur apparente du soleil,) et d'un rayonnement *diffus D* (diffusé par le ciel, les nuages, les aérosols...). On peut écrire : G = I sin *h* + D.

L'énergie reçue est mesurée à l'aide de *pyranomètres* (LAMBOLEY, 1970) dont les limites spectrales sont fixées par la transparence du verre de protection employé.

Le *rayonnement net Q* correspond à la résultante de tous les rayonnements énergétiques, quelle que soit la longueur d'onde (MERMIER et MÉTHY, 1970). Il est mesuré à l'aide de *bilanmètres*, généralement protégés par un film mince de polyéthylène transparent à la quasi-totalité des longueurs d'ondes entre 300 et 40 000 nm.

L'évolution des rayonnements (global et net) est illustrée figure 1. Il s'agit d'une

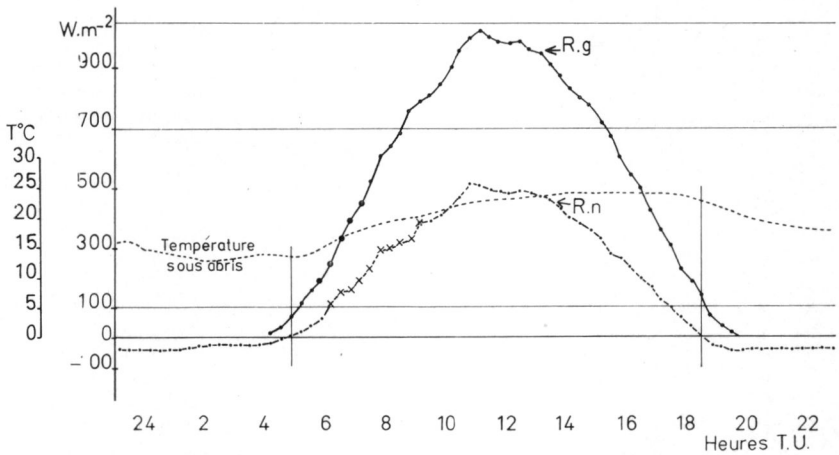



FIG. 1. — *Évolution du rayonnement global* (•), *du rayonnement net* (×) *et de la température sous abri* (- - -) *à Versailles* (3-7-1971)
Beau temps clair. G = 2 700 J cm$^{-2}$/jour ; heures en temps universel

période de beau temps de 24 h (en été, à Versailles). On notera que le rayonnement net nocturne est *négatif*, la terre émettant plus d'énergie qu'elle n'en reçoit.

Le rayonnement *global* est présenté figure 2 pour trois journées caractéristiques. Le rayonnement direct est presque nul par temps couvert (2 juin), et le rayonnement global est formé essentiellement de diffus. Par temps couvert, en hiver, on observe souvent moins de 50 W m$^{-2}$ *à midi*.

En ce qui concerne le *Bilan énergétique*, il provient évidemment de l'énergie solaire, base du cycle de l'eau et de la fonction chlorophyllienne. Une grande partie de l'énergie incidente sert à vaporiser l'eau, soit par évaporation du sol, soit par transpiration des végétaux. Dans la mesure où ce facteur n'est pas limitant, et si aucun apport advectif notable n'intervient au point considéré, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le rayonnement net Q sont peu différents, et voisins de la moitié du rayonnement global. ETP dépend du rayonnement global, mais aussi de la température régnant pendant la période considérée, car le rayonnement net, à G constant, sera d'autant plus important que la température sera plus élevée.

La *composition* du rayonnement solaire, direct et diffus, a fait l'objet de mises au point très complètes (BONHOMME, 1969 ; BONHOMME et VARLET-GRANCHER, 1970 ; MÉTHY, 1970). La répartition spectrale des rayonnements global et diffus (fig. 3),

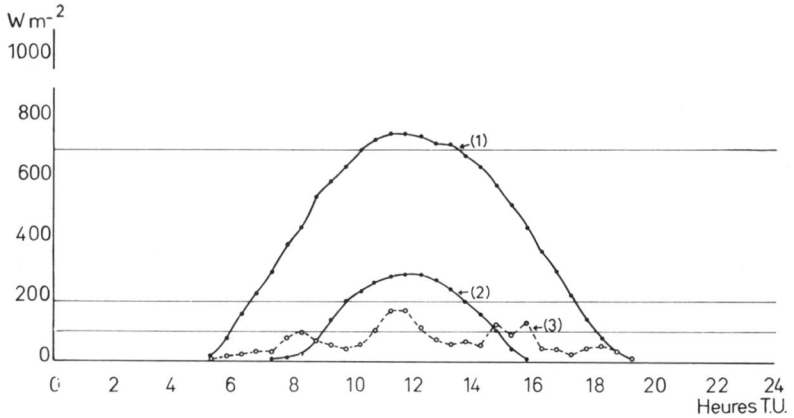



FIG. 2. — *Évolution du rayonnement global pour trois journées caractéristiques à Versailles :*
(1) 12-08 : 2 490 J cm$^{-2}$/jour : beau temps clair d'été
(2) 09-12 : 520 J cm$^{-2}$/jour : beau temps clair d'hiver
(3) 02-06 : 710 J cm$^{-2}$/jour : temps couvert.

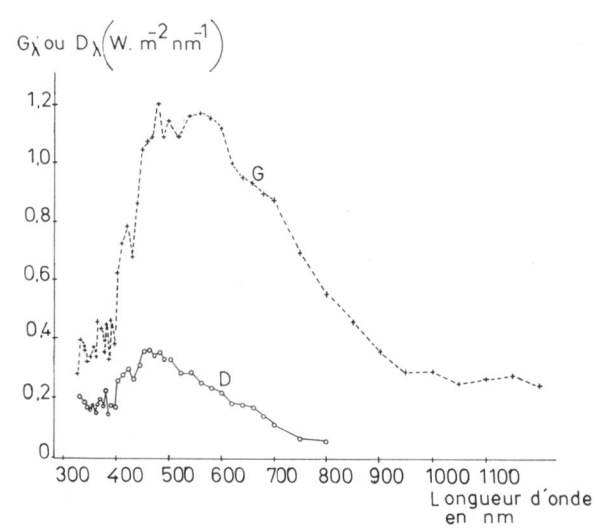



FIG. 3. — *Composition spectrale du rayonnement global G et du rayonnement diffus D à Avignon-Montfavet, le 28-7-1967 à 10 h TSV, par ciel clair*
(d'après R. BONHOMME, 1969)

et les modifications du rayonnement diffus par temps nuageux (fig. 4) ont été empruntées à BONHOMME (1969).

La *répartition spectrale* du rayonnement global arrivant sur un sol horizontal est fortement modifiée quand la *masse atmosphérique* (1) augmente (fig. 5). On cons-

(1) Rappelons que la masse atmosphérique est un indice météorologique qui tient compte de l'épaisseur apparente de l'atmosphère ainsi que de son trouble. Elle peut dépasser 10 quand la hauteur apparente du soleil est inférieure à 5°, elle avoisine 1 vers midi par ciel très clair.

tate que l'émittance maximale passe de 490 nm pour M = 1 à 700 nm pour M = 10, et que dans ces conditions, l'énergie *visible* décroît de 47 à 33 p. 100 du rayonnement global.

La *diffusion* du rayonnement incident par l'atmosphère dépend de la longueur d'onde λ. Pour l'ensemble du spectre, D est peu différent de 0,2 mais atteint

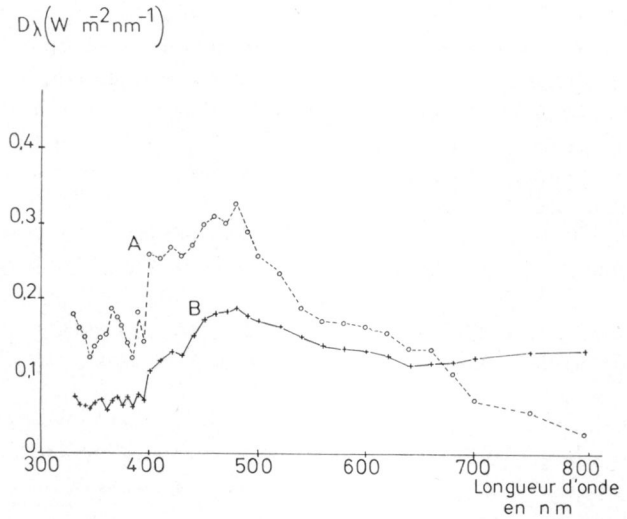



FIG. 4. — *Variation de la composition spectrale du rayonnement diffus D, selon que le ciel est clair* (A) *ou complètement couvert* (B)
(d'après BONHOMME, 1969)

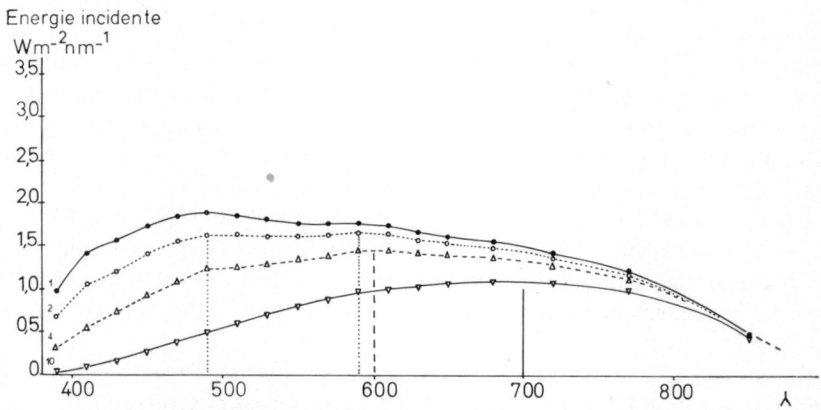



FIG. 5. — *Distribution théorique de l'énergie arrivant sur une surface normale au soleil, pour diverses masses atmosphériques*
(d'après ROBINSON, 1966)

| Longueurs d'ondes λ en nm | Masses atmosphériques 1 | 2 | 4 | 10 |
|---|---|---|---|---|
| 280-2 800 | 1 240 | 1 160 | 1 040 | 840 |
| 280-340 | 33 | 18 | 6 | 0 |
| 340-740 | 583 | 520 | 424 | 255 |
| 740-2 800 | 624 | 622 | 610 | 585 |

Énergies exprimées en W m⁻²

0,45 à 370 nm. La diffusion moléculaire de l'atmosphère gazeuse est proportionnelle à $1^{-4}$ (d'où la couleur bleue du ciel), tandis que la diffusion par les gouttelettes d'eau est indépendante de la longueur d'onde (d'où la couleur blanche des nuages). Quant à l'*absorption sélective* de l'atmosphère, elle dépend du chemin optique des rayons, définis par la masse atmosphérique.

La fraction de l'énergie incidente *réfléchie* par le sol et la végétation est appelée *albedo* (A). Plusieurs études récentes à ce sujet (Fuchs *et al.*, 1971 ; Stanhill *et al.*, 1971) ont fait progresser les connaissances en ce qui concerne le Blé.

Les mesures d'albedo faites à l'aide de cellules photo-électriques dépendent de la courbe de réponse de l'instrument, le plus souvent insensible à l'infrarouge et très sensible au jaune-vert. Les mesures absolues sont faites à l'aide de pyranomètres inversés. Quatre techniques sont actuellement employées pour connaître la fraction du rayonnement réfléchie dans chaque zone spectrale :

— des *filtres interférentiels* placés devant des cellules photo-électriques, sensibles dans le visible ou l'infrarouge, permettent de connaître l'albedo de bandes spectrales *étroites* ;

— des *filtres colorés*, placés sur des pyranomètres, permettent de séparer de larges bandes spectrales, et notamment l'infrarouge du global, et de connaître le visible par différence ;

— la *densité optique* relative de photographies noir et blanc dans le visible et le proche infrarouge (jusqu'à 900 nm environ), ou la *densité de couleurs* de pellicules « couleurs » ou « fausse couleur » permettent d'analyser des variations assez réduites en valeur absolue ;

— des *spectrophotomètres portatifs*, enfin, ont permis récemment de faire des progrès décisifs : ils mesurent dans les *conditions naturelles*, avec un minimum d'artefacts, la *répartition spectrale* de l'énergie incidente et réfléchie, de 25 en 25 ou 50 en 50 nm. Ces appareils sont malheureusement d'un maniement plus ou moins aisé ; ils sont souvent assez fragiles et d'une précision limitée. On sait depuis longtemps que la nature du sol et de la végétation modifient la fraction réfléchie du rayonnement. Grâce à des mesures continues, on a mis en évidence des variations assez importantes, dues à la *hauteur* du soleil sur l'horizon. La plupart des mesures sont faites à l'aide de pyranomètres de *Moll* ou d'*Eppley*, dont la surface sensible est de l'ordre de 1 $cm^2$, et on a montré que leurs dimensions ne sont pas indifférentes : les piles sont plus influencées par les surfaces situées à leur aplomb (ce qui peut expliquer que les mesures faites en avion fluctuent moins que celles faites au sol). Nous utilisons pour nos mesures des pyranomètres linéaires de 35 cm de long, orientés est-ouest (Combres *et al.*, 1970).

Brown *et al.* (1970) ont montré qu'un effet parasite important peut être observé à des hauteurs du soleil inférieures à 5° si des rayons directs atteignent les piles. Par ailleurs, le spectre est fortement décalé vers le rouge sombre, très réfléchi par la végétation, ce qui augmente l'albedo total (Fuchs *et al.*, 1971). Mais les énergies sont faibles et les erreurs d'autant plus grandes que les instruments sont moins sensibles (Stanhill *et al.*, 1971).

La pénétration du rayonnement solaire *direct* jusqu'au sol *vers midi* peut modifier l'albedo : *densité* et *structure* du couvert jouent un rôle important dans ces modifications (Stanhill *et al.*, 1971) (fig. 6) comme aussi les mouvements circadiens et les variations de la turgescence relative de la végétation (Fuchs *et al.*, 1971).

Des mesures faites en avion ont mis en évidence une *anisotropie* de la réflexion des surfaces naturelles, d'autant plus marquée que le soleil est *plus haut* sur l'horizon (BRENNAN et BANDEEN, 1970). A partir du moment où la surface développée dépasse 3 (DUNCAN, 1971), la probabilité pour un rayon d'atteindre le sol dans un couvert continu devient réduite. L'albedo provient de l'*ensemble du feuillage*. Ces réflexions varient avec l'heure du jour dans le cas de plantes à port dressé prédominant comme le Blé (fig. 7) (SCOTT *et al.*, 1968).

On sait aussi que par temps couvert, l'albedo peut être modifié par la couverture nuageuse (STANHILL, 1970).

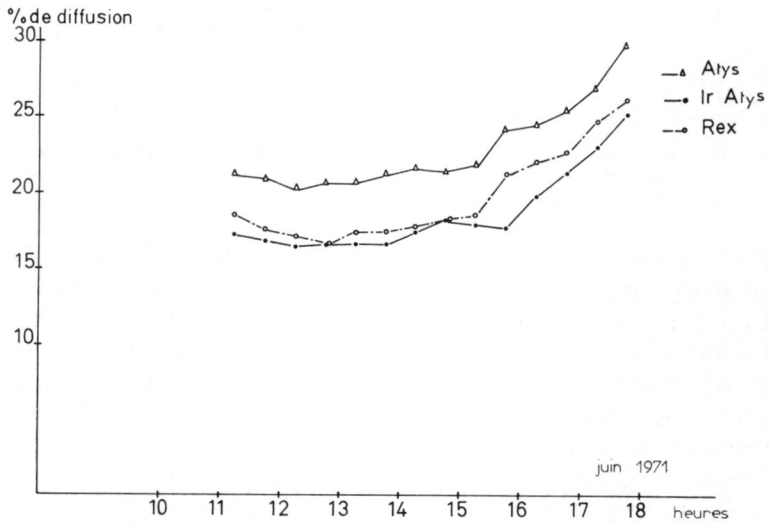



FIG. 6. — *Évolution de l'albedo en fonction de l'heure à Versailles* (juin 1971)
Mesures faites à l'aide de pyranomètres linéaires (d'après BALDY, 1973 *b*)
○– – – : Albedo du Blé *Rex* entre 280 et 2 800 nm
△——— : Albedo du Blé *Atys* entre 280 et 2 800 nm
●——— : Albedo du Blé *Atys* entre 740 et 2 800 nm (infrarouge)

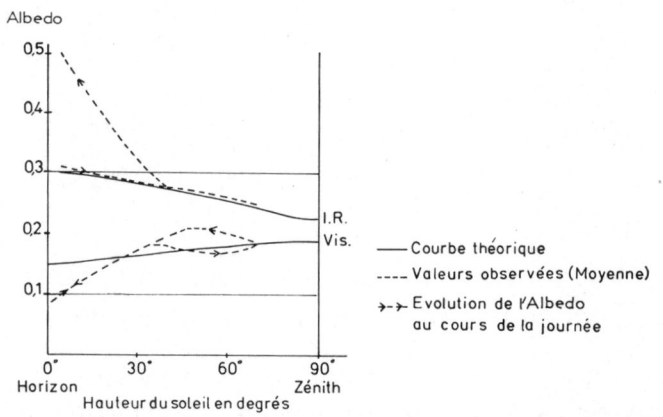



FIG. 7. — *Évolution, sur Blés, en Israël, des fractions visible et infrarouge de l'albedo au cours de la journée, en fonction de la hauteur du soleil*
(d'après FUCHS *et al.*, 1971)

Au cours de la vie du végétal, les modifications d'albedo peuvent être importantes, comme l'ont montré FUCHS *et al.* (1971), et la réflexion de la végétation est généralement plus forte que celle du sol nu (fig. 8).

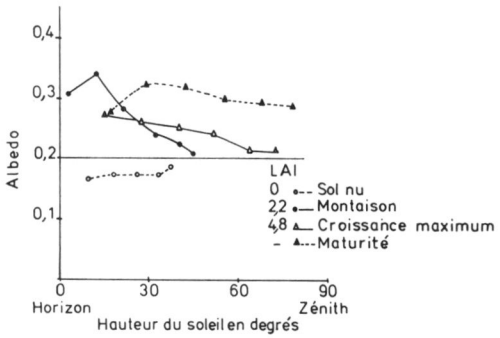



FIG. 8. — *Évolution de l'albedo global, en fonction de la hauteur du soleil, pour différentes valeurs du LAI, au cours de la végétation du Blé*
(d'après FUCHS *et al.*, 1971)

D'assez nombreuses données concernent la *répartition spectrale* de l'albedo. La fraction réfléchie *visible augmente* avec la hauteur du soleil et diminue avec la densité de la culture et avec la hauteur. La fraction *infrarouge croît* avec la *densité* de la végétation et sa *turgescence* relative, mais *décroît* quand la hauteur du soleil croît (fig. 9). Matin et soir, l'albedo infrarouge constitue l'essentiel du rayonnement réfléchi. La fraction *visible* réfléchie est *inversement* proportionnelle à la fraction *diffuse* du rayonnement global (FUCHS *et al.*, 1971).

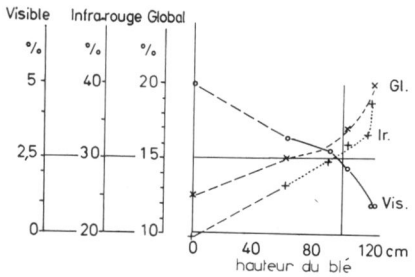



FIG. 9. — *Répartition des albedos global, visible et infrarouge, sur une culture de Blé, en fonction de sa hauteur*
(D'après STANHILL *et al.*, 1971)

## B. — ÉVOLUTION DU « CLIMAT » DU BLÉ EN FONCTION DE SA DATE DE SEMIS

Dans l'hémisphère nord, les *Blés d'hiver* sont semés à partir de septembre, en jours décroissants, et récoltés de fin mai à fin-août, selon la latitude. Par contre, les *Blés de printemps* poussent de fin-février à juillet ou août, et leur cycle végétatif a lieu ainsi en jours croissants.

En zones tropicales et équatoriales, quand il existe des cultures de Blé, les semis sont effectués à des périodes très diverses, dont le choix est gouverné par l'altitude, l'existence d'une saison sèche, d'une période plus froide, ou par une variation importante du rayonnement global durant une certaine période de l'année. L'évolution de ce dernier facteur dans trois cas extrêmes est schématisée (fig. 10) et résumée (tabl. 1), où on a distingué la période de croissance la plus active (*b*), correspondant à la phase allant de la fin du tallage au stade grain-laiteux. Les Blés nord-africains et

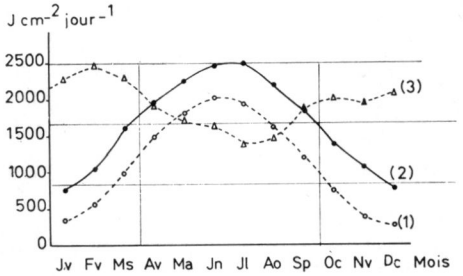



FIG. 10. — *Évolution du rayonnement global.*

Valeurs normales moyennes mensuelles pour (1) Versailles (50° Lat. N), (2) Tunis (36° N) et (3) Nairobi (1° S), en joules $cm^{-2}$ par jour

TABLEAU I

*Sommes du rayonnement global pendant la croissance du Blé*
× 1 000 cal · $m^2$

| Station | | *a* | *b* | *b/a* |
|---|---|---|---|---|
| Versailles | Blés d'hiver | 255 | 195 | 0,77 |
| Versailles | Blés de printemps | 240 | 170 | 0,71 |
| Tunis | Blés de printemps | 255 | 160 | 0,63 |
| Nairobi | Blés de printemps | 295 | 195 | 0,66 |

| | *a*) Durée totale de la végétation | *b*) Périodes de végétation active |
|---|---|---|
| Blés d'hiver Versailles | 1-11 au 1-8 | 15-3 au 30-6 |
| Blés de printemps | 15-3 au 1-8 | 15-4 au 15-7 |
| Tunis | 1-11 au 15-6 | 15-2 au 30-5 |
| Nairobi | 15-5 au 30-10 | 1-6 au 30-9 |

N. B. En zones tempérées, l'énergie utilisée pendant la végétation active est en liaison étroite avec le rendement en grain (5 t/ha dans les Blés d'hiver, 4 t/ha dans les Blés de printemps à Versailles ; 3 t/ha à Tunis). Les températures élevées régnant à Nairobi pendant toute la végétation augmentent l'énergie totale nécessaire (et probablement la respiration et la photorespiration). Le rapport *b/a* est d'autant meilleur que le Blé est mieux implanté à l'automne.

tropicaux sont de même type physiologique que les Blés français de printemps et généralement peu sensibles à la photopériode.

Avec des températures moyennes de 10 à 12°C, les Blés nord-africains se développent normalement. Au Kenya, température et photopériode sont presque constantes, mais une diminution importante de l'insolation (qui ne s'accompagne pas de pluies) paraît influencer favorablement le développement du Blé en juillet-août.

Divers facteurs du climat peuvent avoir une influence néfaste sur le rendement :

— quand des *températures* supérieures à 30°C surviennent pendant les périodes de développement de l'épi et du grain (GESLIN et JONARD, 1948), ce dernier peut en être défavorablement influencé sur le plan de la *qualité* ;

— si de fortes *pluies* saturent le sol à la levée, ou si des orages violents éclatent pendant la maturation, ou si inversement, la culture souffre de fortes *sécheresses* hivernales (fréquentes en Afrique du Nord) ou printanières (catastrophiques au Proche-Orient), des dégâts très importants peuvent en découler pour le Blé.

## C. — MODIFICATIONS SPECTRALES DE L'ÉNERGIE SOLAIRE DANS LE PEUPLEMENT

### I. — *Évolution des parties aériennes du Blé au cours de son cycle végétatif*

La quantité d'énergie transformée en matière sèche évolue constamment au cours de la vie du Blé.

Les interactions entre plantes dans un peuplement se traduisent par un ombrage

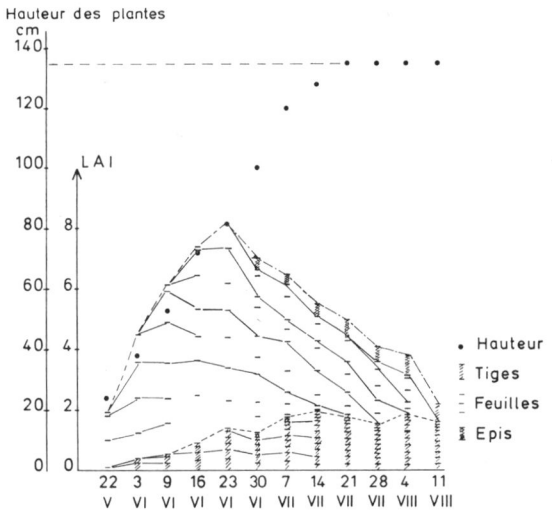



FIG. 11. — *Évolution des éléments constitutifs de l'indice de surface foliaire* (LAI) *au cours de la végétation du Blé de printemps* Colibri, *et hauteur totale des plantes* (d'après SZEICZ, 1969)

Les feuilles sont exprimées en surface d'une face, les tiges et les épis en projection du cylindre

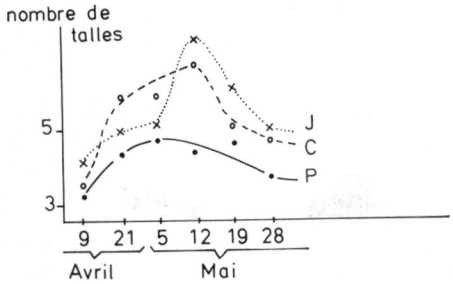



FIG. 12. — *Évolution du tallage moyen par pied de Blés d'hiver: (J) : Joss, (C) : Champlein, (P) : Prieur*
(d'après BALDY, 1973 *b*)

TABLEAU 2

*Évolution de quelques caractères de trois Blés d'hiver au cours de leur croissance*
(BALDY, 1973 *b*)

| | 10-4 | 24-4 | 7-5 | 5-6 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Indice de Surface foliaire (LAI) | 0,50 | 2,24 | 4,34 | 3,73 | *Prieur* |
| | 0,46 | 2,99 | 5,72 | 4,22 | *Moisson* |
| | 0,42 | 3,03 | 5,49 | 5,55 | *Champlein* |
| Hauteur $10^{-2}$ m | 0,10 | 0,33 | 0,54 | 1,10 | *P* |
| | 0,10 | 0,30 | 0,45 | 1,00 | *M* |
| | 0,10 | 0,30 | 0,45 | 0,90 | *C* |
| Poids sec des feuilles $10^{-3}$ kg $m^{-2}$ | 23 | 66 | 143 | 212 | *P* |
| | 22 | 78 | 174 | 265 | *M* |
| | 21 | 86 | 171 | 287 | *C* |
| Poids sec des tiges et épis $10^{-3}$ kg $m^{-2}$ | 23 | 63 | 233 | 1 093 | *P* |
| | 18 | 73 | 257 | 943 | *M* |
| | 17 | 58 | 206 | 831 | *C* |
| Total $10^{-3}$ kg $m^{-2}$ | 46 | 129 | 376 | 1 305 | *P* |
| | 40 | 151 | 431 | 1 208 | *M* |
| | 38 | 144 | 377 | 1 318 | *C* |
| Nombre de pieds par $m^2$ | 224 | 200 | 190 | — | *P* |
| | 184 | 220 | 215 | — | *M* |
| | 208 | 225 | 225 | — | *C* |
| Masse surfacique $10^{-2}$ kg $m^{-2}$ | 460 | 287 | 331 | 466 | *P* |
| | 480 | 247 | 335 | 445 | *M* |
| | 500 | 285 | 327 | 425 | *C* |
| Rapport Tiges/feuilles | 0,98 | 0,96 | 1,60 | 4,25 | *P* |
| | 0,82 | 0,94 | 1,50 | 3,05 | *M* |
| | 0,83 | 0,68 | 1,23 | 2,50 | *C* |

N. B. Observations du 5 juin :
1° Les *LAI* concernent les *feuilles* seulement : tiges et épis peuvent être estimés à 2,5 (en projection plane).
2° *Champlein* : Épiaison. Son LAI foliaire est constant du 7 mai au 12 juin.
3° *Moisson* : Stade fin floraison.
4° *Prieur* : Variété précoce, à évolution beaucoup plus rapide 10 jours après la pleine floraison.
Blés d'hiver cultivés à La Minière (près de Versailles) en 1967-1968.
Le tallage/épi était supérieur à 3 pour les trois cultivars en juin.

mutuel d'un nombre défini de plantes ou de parties de plantes, et en conséquence par une réduction de la masse de racines des plantes les moins éclairées (BALDY, 1973 *a*). Le niveau d'énergie et la qualité de la lumière arrivant au niveau du végétal commandent le développement de son système radical.

Après la levée se place la phase d'occupation du sol. Pendant cette période, chaque plante développe, sur quelques centimètres de hauteur, des feuilles sur lesquelles apparaissent des *talles* qui augmentent la surface couverte. La disposition du feuillage est planophile ou sphérique (DUNCAN *et al.*, 1967). L'ensemble a généralement un aspect prostré, et la surface foliaire par unité de surface de sol (1) est faible. L'indice est voisin de 0,5 à la fin du tallage à 200 pieds par m². Cette phase peut durer plusieurs mois chez les Blés d'hiver.

Au printemps, un redressement apparent des feuilles marque le début de la phase de montaison, et la surface foliaire croît rapidement. La figure 11, tracée d'après des données de SZEICZ (1969), explicite cette évolution. Le LAI dépasse 3 dès que la végétation a 25 cm de haut, pour dépasser 8 à l'épiaison. Il diminue ensuite rapidement, du fait de la disparition rapide des talles herbacés (fig. 12 et tabl. 2).

On a constaté que la lumière pénètre mieux les peuplements à port dressé. Les tiges et épis constituent une composante importante, mais souvent négligé, du LAI. Leur section atteint à la floraison 1,5 pour les tiges et 0,5 pour les épis. Ces organes sont les derniers à avoir une photosynthèse active durant la maturation, et s'il n'est pas versé, le Blé devient alors essentiellement érectophile.

## II. — *Extinction du rayonnement dans la végétation*

Nous avons choisi de présenter une figure (fig. 13) dessinée d'après les données de SZEICZ (1969), en parfait accord avec nos propres résultats, présentés par ailleurs (BALDY, 1973 *b*). Elle représente la variation des rayonnements *visible, infrarouge* et *global* au cours de la journée du 30 juin 1969, à deux niveaux dans la culture : base de la feuille culmaire (LAI 1,7) et à 30 cm au-dessus du sol (LAI 5,4). La fraction visible devient presque nulle à ce dernier niveau. L'évolution du rayonnement

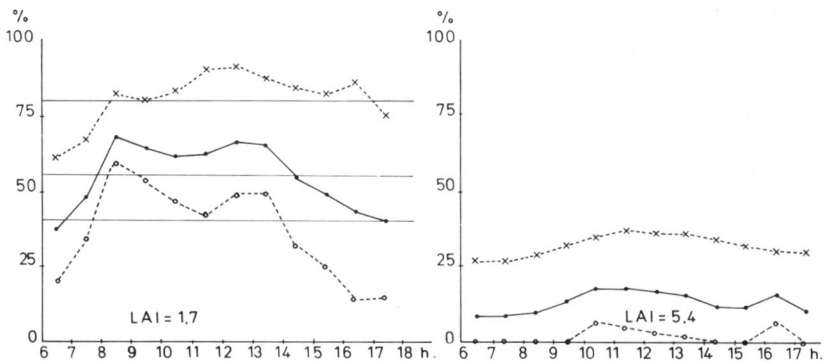



FIG. 13. — *Évolution au cours de la journée de l'énergie globale* (●), *infrarouge* (×) *et visible* (○), *à deux niveaux dans une culture de Blé* Colibri *le 30-6-1969, par temps clair*

*a.* Base de la feuille culmaire : LAI = 1,7 ; *b.* 30 cm au-dessus du sol : LAI = 5,4. Valeurs exprimées en pourcentage du rayonnement incident (d'après SZEICZ, 1969)

(1) Ce rapport, ou Indice de surface foliaire, est souvent abrégé en L. A. I. (Leaf area index). Nous l'exprimons en surface d'une face des feuilles et section plane des tiges et épis.

global dans la végétation est présentée sur la figure 14 pour ce même jour. La réduction de l'éclairement est très rapide, même si on associe *ligne à ligne* (orientées nord-sud) deux cultivars de port très différent : la figure 15 retrace l'évolution de l'énergie au cours d'une journée au niveau de la feuille de l'épi des variétés *Rex* (1 m de haut) et *N 66* (0,60 m de haut) en culture associée : la fraction visible est très réduite au niveau de *N 66*, et le rendement en grain de ce cultivar a été réduit de 90 p. 100 en association!

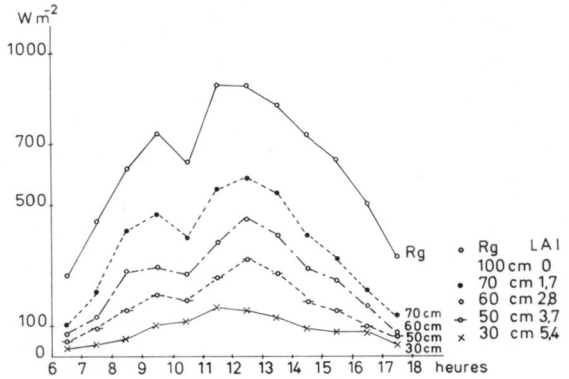



FIG. 14. — *Évolution du rayonnement global aux différents niveaux de mesure dans une culture de Blé* Colibri (30-6-1969) (d'après SZEICZ, 1969)

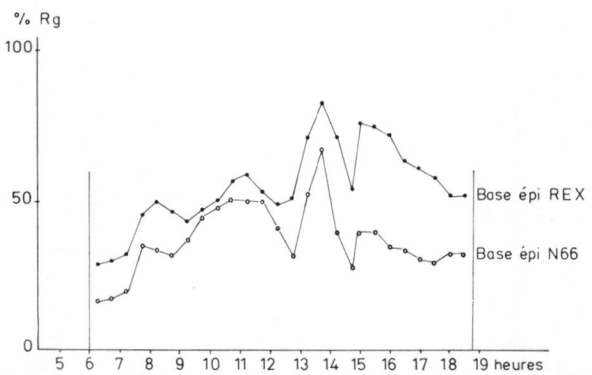



FIG. 15. —*Évolution du rayonnement global au niveau de la base des feuilles de l'épi des Blés* Rex (1 m de hauteur totale) *et* N66 (0,60 m de hauteur totale), *en pourcentage du rayonnement incident.*
L'énergie est mesurée à 0,70 et 0,40 m respectivement, les deux blés étant associés ligne à ligne (d'après BALDY, 1973 *b*)

## III. — *Modifications spectrales dans le peuplement*

On commence à bien connaître l'*action* des différentes longueurs d'ondes sur les pigments photosensibles et les pics d'utilisation de l'énergie par ces pigments. Plusieurs mises au point ont paru récemment en ce domaine. Il y a lieu de citer celle de GAUDILLÈRE et COSTES (1971) sur les *mécanismes* biochimiques de l'assimilation chlorophyllienne, et celle d'EVANS (1970) sur l'action de la lumière visible, dans les processus de *croissance*. D'autre part, BORTHWICK *et al.* (1969), JACQUES (1969), MOHR (1970), VINCENT (1971), ont étudié l'action des formes du *phytochrome* et les

réactions dites de haute énergie. Enfin, l'effet de l'ultra violet proche sur les *tropismes* a été mis en évidence par CURRY (1969).

Une étude de MCCREE (1972) a précisé les *spectres d'utilisation* de la lumière visible par les feuilles de plusieurs espèces, cultivées en plein air et en serre. Il est impossible de résumer ici ce travail, mais la figure 16 rend compte d'un résultat particulièrement intéressant : le *rendement quantique* relatif du Blé cultivé en champ et en

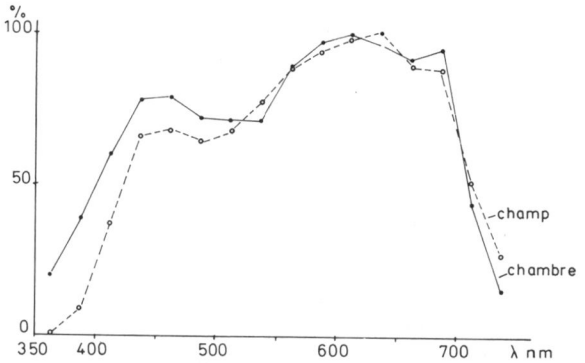



FIG. 16. — *Rendement quantique de feuilles de Blé cultivé au champ et en chambres de culture* (d'après MCCREE, 1972)

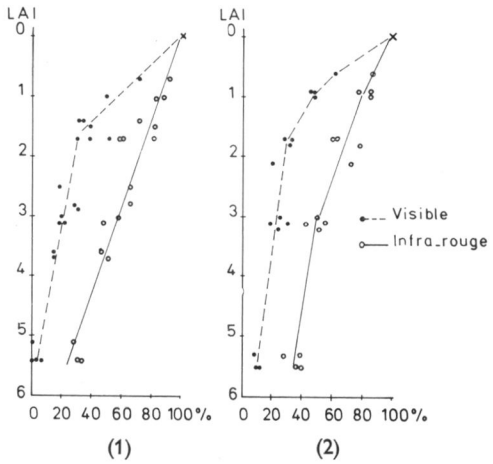



FIG. 17. — *Énergie arrivant aux différents niveaux de la culture, en pourcentage du rayonnement incident, par temps clair* (1) *2 000 à 2 500 J cm⁻² et temps couvert* (2) *600 à 1 200 J cm⁻² par jour.* Rayonnements mesurés dans le visible et l'infrarouge (d'après des données de SZEICZ, 1969)

serre est très différent, en particulier dans le bleu. On constate par ailleurs que la transmission des feuilles dépend de leur épaisseur (MEIDNER, 1970) et que les feuilles situées à la base des plantes ne reçoivent que fort peu de bleu et de violet, mais davantage de rouge clair et de rouge sombre et d'infrarouge (MEIDNER, 1970). De faibles quantités d'énergie étant suffisantes dans les rouges clair et sombre pour induire les transformations du phytochrome (VINCENT, 1971), les modifications de la composition spectrale dans le couvert au cours de la journée peuvent expliquer le déclenchement des processus liés à ces transformations.

La figure 17, dessinée d'après SZEICZ (1969), permet de comparer l'énergie, exprimée en valeurs relatives, arrivant aux différents niveaux de la culture par temps *clair* et *couvert* pour une série de journées de juin 1969. On constate à l'*échelle de la journée* que la fraction visible est faible dès que le niveau de la base de la feuille culmaire (LAI 1,7) est atteint. L'énergie est beaucoup plus importante dans l'infrarouge, et sa décroissance est linéaire en première approximation, quelles que soient les conditions climatiques.

## IV. — *Conclusions*

L'importance de l'absorption de l'énergie visible par les premières feuilles, et l'interception par l'épi et le dernier entre-nœud sont à souligner, comme aussi les modifications spectrales dues à la réflexion et à la transmission sélectives des feuilles. Dès avant l'épiaison, peu d'énergie visible parvient aux feuilles inférieures, sauf au milieu de la journée. Dès que le temps est couvert, l'énergie reste inférieure au *point de compensation* pour la lumière de la photosynthèse dans la partie basse de la végétation. La disparition rapide des talles herbacés après l'épiaison n'a probablement pas d'autre origine.

La morphologie des plantes, et en particulier le port des feuilles et la répartition de celles-ci dans le profil végétal, joue un rôle important aussi vis à vis de l'utilisation de la lumière dans les cultures. Nous allons voir maintenant les implications de ces observations en ce qui concerne la *photosynthèse* du *peuplement*.

*Reçu pour publication en août 1972.*

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 701-704.

# CHRONIQUE DES LIVRES

ABBAYES (H. des), CLAUSTRES (G.), CORILLION (R.), DUPONT (P.). — FLORE ET VÉGÉTATION DU MASSIF ARMORICAIN. Tome I. FLORE VASCULAIRE. — Saint-Brieuc, Presses universitaires de Bretagne, 1971, 1226 p.

Par Massif armoricain, il faut entendre, outre les 5 départements bretons (Loire-Atlantique, Morbihan, Finistère, Côtes-du-Nord, Ille-et-Vilaine) et en plus la Mayenne, les parties armoricaines de 7 autres départements (Vendée, Deux-Sèvres, Maine-et-Loire, Sarthe, Orne, Calvados et Manche). La flore vasculaire des îles Anglo-Normandes figure également dans cet ouvrage puisqu'elles sont une dépendance géologique du Massif armoricain.

Bien que destiné surtout aux botanistes qui connaissent déjà famille et genre d'un échantillon rencontré, des tableaux dichotomiques pratiques permettent aux débutants d'essayer une détermination. Si cet ouvrage comporte une illustration réduite, pour éviter d'augmenter démesurément le format et l'épaisseur et pour qu'il reste une Flore de terrain, il contient néanmoins un vocabulaire de termes botaniques avec des schémas (morphologie foliaire, types d'inflorescences, positions de l'ovaire et types de placentation).

La description des plantes de la Flore comporte des commentaires généraux sur les embranchements, les groupes et les familles et pour chaque espèce une description morphologique détaillée, suivie de divers renseignements sur l'écologie (landes, marais, sables maritimes etc.), la fréquence, les types biologiques (thérophyte, hélophyte, hydrophyte etc.), la chorologie (aire des espèces dans le monde) et s'il s'agit de plantes introduites ou adventices.

Mais le but de cet ouvrage est surtout d'insister sur la distribution géographique des espèces et pour chaque plante, la liste des localités où elle se trouve est donnée. Dans son « Avertissement » l'auteur, sous la direction duquel a été publié cet ouvrage, précise que « cela doit permettre, d'une part aux botanistes herborisant dans notre région de savoir où chercher telle plante qu'ils désirent récolter et aussi de se rendre compte si une récolte faite par eux est inédite, et d'autre part aux phytogéographes de pointer sur une carte de distribution un lieu précis ».

En plus des annexes déjà signalées (vocabulaire, clé de détermination), cette Flore comporte un index alphabétique des noms latins (ne comprenant pas les noms inférieurs aux sous-espèces), des notices brèves sur les botanistes les plus cités, souvent en abrégé, pour la répartition géographique des espèces, une bibliographie sommaire et enfin une liste des signes, symboles, conventions et abréviations.

J. L. G.

HUGHES (H. D.), METCALFE (S. D.). — CROP PRODUCTION. — (3rd edition) New York, London, The Macmillan Company, 1972, 627 p.

Destiné aux étudiants et enseignants des sciences agronomiques, cet ouvrage comprend 42 chapitres dont la moitié environ concerne les problèmes généraux de la production végétale, et l'autre moitié les cas particuliers posés par chaque type de plante cultivée.

Après avoir, en quelques chapitres, évoqué l'histoire de l'agriculture moderne, et exposé les données récentes de la production végétale dans le monde et plus spécialement aux États-Unis, les auteurs traitent tour à tour des principaux facteurs influençant la productivité des récoltes : ils en donnent les bases scientifiques indispensables (classification des plantes, structure et croissance des végétaux, racines, besoins en eau etc.) tout autant que techniques (irrigation, drainage, pratiques culturales, rotation des cultures etc.).

Viennent ensuite des chapitres consacrés chacun à une plante ou à un type de plante (maïs, sorgho, graminées diverses, plantes oléagineuses, plantes à fibre, plantes fourragères, pomme de terre, tabac etc.). Là encore, sont mêlées des considérations scientifiques et techniques ou économiques : origine de la plante, production dans le monde et aux États-Unis, variétés sélectionnées, pratiques culturales, récolte, conservation, intérêt économique.

Par rapport aux deux précédentes éditions (1930 et 1957), certains chapitres ont été remaniés (production mondiale) ou fusionnés en un seul (ennemis des cultures) et trois chapitres nouveaux ont été ajoutés (population humaine et production végétale du monde, climat, météorologie et récoltes, et enfin l'influence de la pollution de l'air, de l'eau et du sol sur les cultures).

Une particularité de cet ouvrage réside dans le fait que les nombreux tableaux, figures et illustrations sont accompagnés de questions incitant le lecteur à la réflexion, et que chaque chapitre est suivi de questions s'y rapportant.

En outre, les auteurs proposent une série de références bibliographiques pour approfondir le thème, en plus des références citées dans le texte lui-même.

Un index alphabétique par matières, et un lexique donnant de courtes définitions des termes scientifiques et techniques employés, complètent cet ouvrage.

J. L. G.

La pensée géographique française contemporaine. — Mélanges offerts au professeur A. Meynier. — Université de Haute-Bretagne, Saint-Brieuc, Presses Universitaires de Bretagne, 1972, 716 p.

Cet ouvrage dédicacé au professeur André Meynier se compose de 59 articles, tous d'auteurs différents et regroupés selon 8 grands thèmes :

I. *La formation du géographe* (9 articles) : Des aspects très variés de cette question sont traités, depuis le rôle et la place de la géographie dans les enseignements primaire et secondaire, jusqu'aux applications de la géographie et les débouchés pour les étudiants. On y trouve également plusieurs articles sur différentes méthodes pédagogiques (excursions, films, enquêtes, contrôle continu des connaissances).

II. *Problèmes de méthode* (10 articles) : Plusieurs contributions sur les méthodes de pensée, d'analyse et de recherche, les relations de la géographie et de l'histoire, la place de la cartographie dans le travail géographique et la science du paysage.

III. *Le milieu naturel* (12 articles) : Il s'agit de réflexions sur la géomorphologie, son enseignement et sa pratique, ses rapports avec des « sciences voisines ». Des cas précis sont aussi traités (formations superficielles en France, morphologie du Massif central, relief alpin...) permettant de souligner l'évolution des idées et des méthodes dans ce domaine.

IV. *Le milieu humain* (7 articles) : A diverses considérations sur la naissance et les aspects religieux de la géographie humaine, succèdent les questions relatives à la géographie sociale, la géographie des investissements et la géographie industrielle. Signalons aussi un article consacré à la biométéorologie humaine et la pathologie géographique.

V. *Le milieu rural* (6 articles) : Cette cinquième partie se compose d'articles généraux sur l'évolution des idées en matière de géographie agraire et d'aménagement rural, ainsi que d'articles concernant plus directement une région (bocage en Bretagne, Provence, région nantaise, exploitations agricoles en gestion dans la Sarthe).

VI. *Le milieu urbain* (4 articles) : Paris et Bordeaux servent à illustrer quelques aspects de géographie historique et d'évolution du paysage urbain. Les sources et les méthodes d'étude de l'espace bâti d'une agglomération et la notion de « bourg » en France complètent cette partie de l'ouvrage.

VII. *La circulation* (5 articles) : Études surtout consacrées aux transports ferroviaires (histoire mondiale, géographie des réseaux français), aux ports en France et à la circulation maritime.

VIII. *La région* (6 articles) : On trouvera dans cette dernière partie des conceptions théoriques sur la géographie régionale, des exemples concrets de région « espace vécu » (région d'un artisan havrais au début du siècle, région d'une famille sarthoise, régiond 'un ouvrier d'Hérouville) et d'autres problèmes comme les relations villes-campagnes, la pollution, la départementalisation.

Une liste des principales publications d'André Meynier complète l'ouvrage.

J. L. G.

Spedding (C. R. W.), Diekmahns (E. C.). — Grasses and legumes in british agriculture. — Commonwealth Agricultural Bureaux, Oxford, Alden and Mowbray Ltd., 1972, 510 p.

L'objet de ce livre, réalisé avec le concours de nombreux spécialistes fourragers, est de faire le point sur les connaissances des principales légumineuses et graminées prairiales utilisées en Grande-Bretagne.

Divisé en quatre grands chapitres :

I — Introduction, dans laquelle sont rappelés les facteurs agro-climatiques britanniques,
II — Les graminées,
III — Les légumineuses,
IV — Évaluation comparative des espèces cultivées,

cet ouvrage souligne les principales caractéristiques biologiques et agronomiques de chaque espèce liées à la production et à leur utilisation par les animaux.

A. H.

CARLIER (M.). — HYDRAULIQUE GÉNÉRALE ET APPLIQUÉE. — Paris, Eyrolles, 1972, 567 p.

Cet ouvrage reproduit, en le développant, le contenu de l'enseignement dispensé par l'auteur pendant dix ans à l'École Nationale du Génie rural.

Après une introduction consacrée au développement de l'art et de la science de l'Hydraulique à travers les âges, les chapitres II à V traitent des notions classiques de Mécanique des liquides, montrant comment l'utilisation du seul « outil mathématique » permet d'analyser le comportement du liquide parfait ou visqueux. Le domaine d'application des résultats obtenus est relativement limité et le recours à l'expérimentation est indispensable pour fournir à l'ingénieur les méthodes d'analyse permettant d'établir les formules susceptibles de traduire le comportement du liquide dans les divers cas de la pratique courante.

C'est l'objet des chapitres suivants traitant successivement des écoulement en charge, à surface libre et dans les sols et s'achevant par l'étude des lois de similitude et leurs applications aux essais sur modèles réduits et par les modèles mathématiques.

Cette seconde partie qu'on pourrait intituler l' « Hydraulique » au sens restreint du terme, associe la théorie pure et l'expérience, traduisant la double origine de cette science qui en constitue l'originalité.

Cet ouvrage a été conçu pour faciliter aux ingénieurs la compréhension des phénomènes en insistant sur la diversité des paramètres physiques qui régissent les conditions d'écoulement des liquides dans les divers cas de la pratique courante et sur le caractère souvent très approximatif des formules proposées pour analyser les écoulements les plus usuels ; le recours à l'expérimentation sur modèle réduit reste alors souvent le seul recours possible pour résoudre complètement le problème lorsque ses paramètres s'éloignent par trop de ceux des écoulements classiques.

La plupart des chapitres comportent des développements orientés vers les applications pratiques dans les domaines de l'Ingénieur hydraulicien, du Génie civil ou du Génie rural ; tel est le cas notamment, des écoulements dans les canalisations en charge, des écoulements à surface libre et de l'hydraulique souterraine.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. TERMES DE L'ENVIRONNEMENT INTÉRESSANT L'AGRICULTURE. — (Anglais-Français-Espagnol). Rome, F. A. O., 1972, 123 p.

Pour la plupart, les 1 001 termes contenus dans ce bulletin ont été glanés dans les documents des Nations Unies et de la F. A. O., afin d'assurer la concordance terminologique à l'intérieur du système des Nations Unies.

Les termes sont énumérés dans l'ordre alphabétique anglais, ceux-ci étant précédés d'un numéro et suivis des équivalents en français et en espagnol. Dans les index pour chacune des langues — anglais, français et espagnol (pages 74-122) — le numéro qui accompagne chaque terme indexé permet d'en trouver rapidement l'équivalent dans la partie principale.

ARNON (I.). — CROP PRODUCTION IN DRY REGIONS. Vol. II. SYSTEMATIC TREATMENT OF THE PRINCIPAL CROPS. — London, Léonard Hill, 1972, 683 p. (A plant science monograph, Coll. dir. by. N. Polunin).

Le volume I de cet ouvrage a été recensé dans les *Annales agronomiques*, n° 4, 1972. Ce second volume est consacré aux différentes cultures des régions arides et semi-arides.

Pour chacune d'entre elles, (céréales, légumineuses, coton, plantes oléagineuses, betterave à sucre, canne à sucre), l'auteur étudie les variétés, les techniques culturales, les maladies et parasites et méthodes de lutte, les problèmes de rendement.

Une partie spéciale est consacrée au problème fourrager dans ces régions.

NIELSEN (D. R.), JACSKON (R. D.), CARY (J. W.), EVANS (D. D.), ed. — SOIL WATER. — Madison, Wisconsin (U. S. A.), American Society of Agronomy, 1972, 175 p.

Cet ouvrage résulte du travail en collaboration d'un groupe de chercheurs spécialistes de la physique du sol, qui ont participé à un programme de recherches sur le thème : relations sol-eau-plante dans des conditions d'irrigation.

Destiné essentiellement aux techniciens et étudiants, l'ouvrage comprend 7 chapitres, complétés chacun par des références bibliographiques :

— le système sol-eau,
— propriétés du système sol-eau en tant que solide et fluide,
— analyse théorique,
— mouvement de l'eau dans des conditions de température constante,
— influence de la température sur le transport de l'eau en sol non saturé,
— écoulement, dans des conditions de température constante, de solutions aqueuses non homogènes,
— recherches au champ.

LARRAS (J.). — PRÉVISION ET PRÉDÉTERMINATION DES ÉTIAGES ET DES CRUES. — Paris, Eyrolles, 1972, 160 p.

L'ouvrage de J. LARRAS a pour objet de familiariser les spécialistes des problèmes de l'eau avec les méthodes les plus récentes de prévision et de prédétermination des étiages et des crues, dans un esprit pratique qui permette de déboucher sur des réalisations concrètes.

L'objet même du livre a conduit à le diviser en deux parties : la première concerne les étiages, et la seconde concerne les crues. Chacune de ces deux parties comporte elle-même trois grandes divisions : un exposé des problèmes à résoudre et des précautions à prendre pour en aborder correctement la solution, un exposé des méthodes de prévision, c'est-à-dire des moyens de connaître l'évolution la plus probable à court terme des phénomènes en cours ou sur le point d'apparaître ; et un exposé, enfin, des méthodes de prédétermination, soit, en d'autres termes, des moyens d'évaluer les possibilités et les probabilités d'apparition des phénomènes exceptionnels à plus ou moins long terme.

*Ann. agron.*, 1972, **23** (6), 705-708.

## TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE

Ch. BALDY. — Sur l'énergie active en photosynthèse, son utilisation par des graminées au cours de leur développement. Cas particulier de peuplements de blé ..... 685

Y. BELOT, C. CAPUT, G. GUYOT, C. SAMIE. — Effet local d'un brise-vent mince sur la dispersion des polluants émis au niveau du sol ..... 123

P. BROCHET, N. GERBIER. — Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle ..... 31

B. CABIBEL. — Mobilisation du potassium du sol au cours d'une culture Stanford-De Ment ..... 101

B. CABIBEL. — Mobilisation du K des sols par le NaTPB en relation avec le comportement des cultures ..... 355

G. CALLOT. — Méthode d'appréciation et de classement des terres de Causse en vue du défrichement. Un exemple sur les Causses Sud-Aveyron ..... 145

Y. CLOUET, A. FÉODOROFF, A. LIBOIS, S. MÉRIAUX. — Infiltration et déplacement d'un traceur localisé dans un sol non saturé. Effet de l'humidité initiale ..... 461

B. COCHARD et H. MANICHON. — Assolements et successions de cultures en Aunis ..... 517

M. COPPENET, Éliane MORÉ, L. LE CORRE, Micheline LE MAO. — Variations de la teneur en cobalt des ray-grass. Étude de techniques d'enrichissement .. 165

A. FAURE et J.-C. FIÈS. — Étude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. 317

J.-C. FIÈS, S. HÉNIN et G. MONNIER. — Étude de quelques lois régissant la porosité de matériaux meubles ..... 621

L. GACHON. — Fractionnement du phosphore labile en relation avec le type de sol ..... 429

L. GACHON. — La cinétique de l'absorption des éléments nutritifs majers chez le tournesol ..... 547

R. GRAS. — Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. I. — Comportement des éléments grossiers poreux vis-à-vis de l'eau ..... 197

R. GRAS. — Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. II. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers. Variations positives d'humidité ..... 247

R. GRAS. — Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. III. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments

grossiers, variations négatives d'humidité..... 379
R. Guennelon, A. Conésa et A.-M. de Cockborne. — Relations entre les propriétés des sols et l'absorption du strontium par une culture de ray-grass en sols calcaires..... 497
J.-G. Huguet, F. Limouzin. — Carence en magnésium du pommier *Golden Delicious* en culture hydroponique..... 655
P. Jambu, Thérèse Dupuis, J. Dupuis. — Étude de quelques aspects de la fixation du fer par les acides humiques..... 333
F. Lemaire. — Étude de différents facteurs influençant la manifestation de l'effet spécifique de la matière organique sur les végétaux..... 77
A. Marin-Laflèche. — Les classements de terrains..... 5
Suzanne Mériaux. — Influence de la sécheresse sur la croissance, le rendement et la composition de la féverole..... 533
M. Mingeau, M. Robelin. — Le transfert de l'eau dans la plante : action particulière de la nutrition azotée..... 419
J. Morizet, M. Robelin. — La poussée radiculaire. Déterminations, mécanisme, implications..... 479
J. Muller. — Identification des formes de la matière organique dans les sols de la Champagne crayeuse..... 587
W. Routchenko, J.-P. Soyer. — Causes de la germination sur plante de grains immatures de maïs. II. — Données complémentaires..... 445
H. Sedghi. — Étude de l'écoulement de cases lysimétriques..... 51
C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme. — Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*. I. — Étude théorique de l'influence de l'héliotropisme des feuilles sur l'interception des rayonnements..... 407
M. Vilain. — Possibilités d'utilisation d'un système analogique pour l'étude des phénomènes de diffusion..... 611

*Notes.*

H. Boutière. — Sols flottants artificiels pour cultures expérimentales..... 567
C. Duthion. — Essai d'application des propriétés de l'éthylène-glycol à la détermination du potassium des sols utilisable par les végétaux..... 369
Rose Mazoyer. — L'ionométrie : ses possibilités d'application au dosage de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal en agronomie..... 673

*Chronique des livres*..... 115, 469, 577, 701

## CONTENTS

Ch. Baldy. — On active photosynthetic energy; its use by graminates during their growth..... 685
Y. Belot, C. Caput, G. Guyot, C. Samie. — Local effect of a thin windbreak on dispersion of pollutants emitted at ground level..... 123

P. Brochet, N. Gerbier. — A practical method of calculation of the potential evapo-transpiration ..... 31

B. Cabibel. — Putting potassium of the soil in action using the Stanford-De Ment cultural working method ..... 101

B. Cabibel. — Releasing the potassium of soils by NaTPB in relation with the growth of crops ..... 355

G. Callot. — Method of evaluation and grading of the « Causse » soils for land clearing purposes. Example in the Southern Aveyron Causses ..... 145

Y. Clouet, A. Feodoroff, A. Libois, S. Mériaux. — Infiltration and leaching of a located tracer in an unsaturated soil. Effect of initial moisture content 461

B. Cochard, H. Manichon. — Crop rotation and cultivation in breaks in Aunis (France) ..... 517

M. Coppenet, Éliane Moré, L. Le Corre, Micheline Le Mao. — Variations of rye-grass cobalt content. Investigating enriching methods ..... 165

A. Faure, J.-C. Fiès. — Experimental study of the compaction sensitivity of loose materials according to the particle-size distribution ..... 317

J.-C. Fiès, S. Hénin, G. Monnier. — Study of some laws governing porosity of loose materials ..... 621

L. Gachon. — Fractionating labile phosphorus in relation with the type of soil ..... 429

L. Gachon. — Kinetics of absorption of the chief nutrients in the sunflower .. 547

R. Gras. — Effects of the coarse constituents on the dynamics of water in a sandy soil. I. — Behaviour of the coarse and porous constituents with respect to water ..... 197

R. Gras. — Effects of the coarse constituents on the dynamics of water in a sandy soil. II. — Dynamics of water in a fine-earth/coarse constituents system. Positive moisture changes ..... 247

R. Gras. — Effects of the coarse constituents on the dynamics of water in a sandy soil. III. — Dynamics of water in a fine-earth/coarse constituents system. Negative moisture changes ..... 379

R. Guennelon, A. Conésa, A.-M. de Cockborne. — Interrelated properties of soils and strontium uptake by rye-grass grown on calcareous soils .... 497

J.-G. Huguet, F. Limouzin. — Deficiency in magnesium of the hydroponically cultivated « Golden Delicious » apple tree ..... 655

P. Jambu, Thérèse Dupuis, J. Dupuis. — Study of a few aspects of iron fixation by humic acids ..... 333

F. Lemaire. — Study of various factors affecting manifestation of the specific effect of organic matter on plants ..... 77

A. Marin-Laflèche. — Soil grading ..... 5

Suzanne Mériaux. — The influence of drought on the growth, yield and composition of the field bean ..... 533

J. Morizet, M. Robelin. — Root pressure ; measurement, mechanism, implications ..... 479

J. Muller. — Identification of the different kinds of organic matter in the soils of the cretaceous « Champagne » ..... 587

W. ROUTCHENKO, J.-P. SOYER. — Causes of the germination of immature maize grains on the plant. II. — Additional particulars ..... 445
H. SEDGHI. — Study of flow in lysimeters ..... 51
C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Use of solar radiation by a crop of *Vigna sinensis*, I. — Theoretical study of light interception as influenced by heliotropism ..... 407
M. VILAIN. — Possible application of an analogue system for investigating diffusion phenomena ..... 611

*Notes.*

H. BOUTIÈRE. — Artificial floating soils for experimental cultivation ..... 567
C. DUTHION. — Testing the properties of ethylene-glycol applicable to determination of the potassium available for plants in various soils ..... 369
Rose MAZOYER. — Ionometry : Its application to the determination of nitric nitrogen and ammonia nitrogen in agronomy ..... 673

*Book reviews* ..... 115, 469, 577, 701

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* : (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part.* Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

*Envoi du manuscrit :* M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Correction des épreuves :* les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

*Le Directeur-Gérant :* M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1973.

*Dépôt légal: 1er trimestre 1973. N° d'impression: 2167.*